

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**Инженерно-физический факультет**

**Ю.А. Гужель**

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ**  
**ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**  
**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**



**Благовещенск**  
**2022**

ББК 35  
Г 93

*Печатается по решению  
редакционно-издательского совета  
инженерно-физического факультета  
Амурского государственного  
университета*

**Гужель Ю.А.**

Процессы и аппараты химической технологии. Лабораторный практикум.  
Учебное пособие / Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2022. – 156 с.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Химическая технология».

Учебное пособие включает 18 лабораторных работ, выполнение которых позволит обучающимся сформировать компетенции в области типовых гидромеханических, тепловых и массообменных процессов и аппаратов химической технологии, являющихся составными частями сложных современных технологических установок переработки нефти, природного и попутного углеводородных газов. Пособие составлено в соответствии с требованиями ФГОС ВО, основной профессиональной образовательной программой высшего образования направление подготовки 18.03.01 «Химическая технология», направленность (профиль) образовательной программы «Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов», и рабочей программой дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии».

### **В авторской редакции**

*Рецензенты:*

А.М. Козлов, к.т.н., доцент кафедры Газохимии РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

С.А. Лескова, к.х.н., доцент кафедры химии и химической технологии АмГУ

© Амурский государственный университет, 2022

© Ю.А. Гужель, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Правила техники безопасности	7
Гидромеханические процессы	9
Лабораторная работа № 1 Исследование гидравлических сопротивлений трения (по длине)	9
Лабораторная работа № 2 Исследование местных гидравлических сопротивлений	13
Лабораторная работа № 3 Исследование преобразования форм энергии струи	16
Лабораторная работа № 4 Определение режимов движения жидкости	20
Лабораторная работа № 5 Гидродинамика псевдооживленного слоя	23
Лабораторная работа № 6 Исследование теплообменных явлений в псевдооживленном слое	33
Лабораторная работа № 7 Определение напорно-расходной характеристики насоса	43
Лабораторная работа № 8 Исследование работы двух насосов с параллельным и последовательным соединением	48
Лабораторная работа № 9 Изучение устройства и принципа работы поршневого воздушного компрессора	55
Тепловые процессы	63
Лабораторная работа № 10 Исследование работы теплообменных аппаратов при теплообмене между системами пар-жидкость и жидкость-газ	63
Лабораторная работа № 11 Исследование зависимости коэффициента теплопередачи (теплоотдачи) между системами пар-жидкость от скорости движения жидкой среды	76
Лабораторная работа № 12 Исследование зависимости коэффициента теплопередачи (теплоотдачи) между системами жидкость-газ от	80

скорости движения газовой среды	
Массообменные процессы	85
Лабораторная работа № 13 Изучение гидродинамических явлений в тарельчатой колонне	85
Лабораторная работа № 14 Изучение гидродинамических явлений в насадочной колонне	98
Лабораторная работа № 15 Определение коэффициентов массо- и теплопередачи при контакте воздуха и воды на колпачковых тарелках массообменных колонных аппаратов	106
Лабораторная работа № 16 Изучение работы ректификационной установки	118
Лабораторная работа № 17 Исследование процесса абсорбции диоксида углерода (CO <sub>2</sub> ) водой в насадочной колонне	130
Лабораторная работа № 18 Исследование процесса адсорбции в неподвижном слое адсорбента	141
Рекомендуемая литература	151
Справочные данные	152

## ВВЕДЕНИЕ

В химической промышленности осуществляются разнообразные процессы, в которых исходные материалы в результате химического взаимодействия претерпевают глубокие превращения, сопровождающиеся изменением агрегатного состояния, внутренней структуры и состава веществ. Наряду с химическими реакциями, являющимися основой химико-технологических процессов, протекают и многочисленные физические и физико-химические процессы. К ним относятся: перемещение жидкостей и газов, нагревание и охлаждение веществ, их перемешивание, разделение жидких и газообразных неоднородных систем, выпаривание, сушки и др.

Процессы и аппараты, общие для различных отраслей химической технологии, называют основными процессами и аппаратами.

В зависимости от закономерностей, определяющих скорость процессов различают гидромеханические, тепловые, массообменные и химические процессы.

1. Гидромеханические процессы описываются законами гидродинамики. К ним относятся: осаждение, фильтрование, перемешивание и др.

Движущей силой этих процессов является разность плотностей фаз и разность давлений.

2. Тепловые процессы описываются законами теплопередачи (теплообмена). К ним относятся: нагревание, охлаждение, конденсация, испарение, плавление, затвердевание и др.

Движущей силой этих процессов является разность температур.

К тепловым процессам могут быть отнесены и процессы охлаждения до температур более низких, чем температура окружающей среды (процессы умеренного и глубокого охлаждения), но чаще их выделяют в отдельную группу холодильных процессов.

Скорость тепловых процессов в значительной степени зависит от гидродинамических условий, при которых осуществляется перенос тепла между теплообменивающимися средами (скорость, режим течения).

3. Массообменные (диффузионные) процессы описываются законами массопередачи (массообмена), их скорость определяется скоростью перехода вещества из одной фазы в другую. К ним относятся: ректификация, дистилляция, перегонка, абсорбция, адсорбция, экстракция, сушка и др.

Движущей силой процессов является разность концентраций вещества (компонента) в разных фазах.

4. Химические (реакционные) процессы. В них осуществляется химическое превращение исходного вещества. К ним относятся: термический крекинг, пиролиз, каталитический крекинг, гидрокрекинг, каталитический риформинг, гидроочистка, алкилирование, изомеризация, полимеризация и др. Скорость процесса определяется законами химической кинетики.

## **ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ**

До проведения лабораторных работ на установках студенты обязательно должны пройти инструктаж по технике безопасности согласно инструкции, которая включает в себя следующие основные положения:

### *Общего назначения*

Все работы на установках должны проводиться только в присутствии и участии преподавателя или ответственного лица, прошедшего полной инструктаж по соблюдению правил техники безопасности.

Место, где размещены установки, запрещается загромождать посторонними предметами.

Перед включением установки произвести тщательный осмотр оборудования и приборов для определения их пригодности к работе. Электрические шнуры, вилки, розетки и выключатели не должны иметь видимых повреждений. Включать установку при наличии неисправностей запрещается.

Во время выполнения задания студенты не должны заниматься посторонними делами, не относящимися к выполнению данной работы.

Запрещается оставлять без наблюдения действующую установку.

Запрещается работать в лаборатории одному. Обязательно присутствие второго лица для оказания первой помощи в случае необходимости.

Студентам запрещается самостоятельно устранять неисправности лабораторных установок.

### *Электробезопасность*

Ввиду наличия на установках высокого напряжения 220 В для питания электродвигателей, ТЭНов и контрольно-измерительных приборов запрещается:

- а) проникать за защитные ограждения присоединительных клемм;
- б) открывать распределительный щит и защитные кожухи установки;
- в) включать и отключать установку без разрешения преподавателя.

г) во избежание возможного поражения электрическим током, запрещается касаться при включенной установке одновременно питающих проводов измерительных приборов, оборудования и трубопроводов отопления, водопровода или заземляющего контура. При поражении электрическим током необходимо немедленно вызвать врача, а до его прибытия оказать пострадавшему первую медицинскую помощь.

д) установка должна быть немедленно отключена, если обнаружено повреждение заземления, защитного ограждения и при внезапном прекращении подачи энергии.

При появлении дыма из электронагревателей, другого оборудования или пускорегулирующей аппаратуры и при других аварийных ситуациях, немедленно отключить установку аварийной кнопкой «Стоп» и сообщить преподавателю.

По окончании работы установка должна быть отключена в строгом соответствии с указаниями, приведенными в лабораторном практикуме.

Перед уходом студенты обязаны привести в порядок свое рабочее место и поставить в известность преподавателя об окончании работы.

# ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

## Лабораторная работа № 1

### «Исследование гидравлических сопротивлений трения (по длине)»

*Цель работы:* повышение уровня знаний о гидравлических сопротивлениях при движении жидкости по трубам, приобретение навыков их самостоятельного определения.

*Задачи работы:*

1. Закрепить сведения о видах гидравлических сопротивлений и способах их определения.
2. Измерить сопротивление трения движению жидкости по трубе.
3. Сравнить экспериментальные и расчетные данные.

#### Общие сведения

Существует два вида потерь гидравлического напора при движении жидкости: потери на трение при движении по прямым участкам трубопроводов и потери на вихреобразование при каждом изменении конфигурации проходного сечения. Первые их них называют потерями на трение ( $\Delta P_T$ ), а вторые – потерями на местные сопротивления ( $\Delta P_M$ ), т.е.

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_M \quad (1.1)$$

Потери гидравлического напора, связанные с распределенными по длине трубопровода потерями на трение, рассчитывают по формуле Дарси-Вейсбаха, так же как часть гидродинамического напора движущегося потока:

$$\Delta P_T = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\alpha \cdot \rho \cdot v^2}{2}$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления трения;

$\lambda, d$  – длина и диаметр трубопровода, м;

$\alpha$  – коэффициент Кориолиса. При  $Re < 2320$  принимается равным 2;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – скорость движения жидкости по трубопроводу, м/с.

Коэффициент гидравлического сопротивления определяется двумя факторами – значением числа Рейнольдса и шероховатостью трубопровода.

## Описание лабораторной установки

Схема блока лабораторной установки представлена на рисунке 1.1.

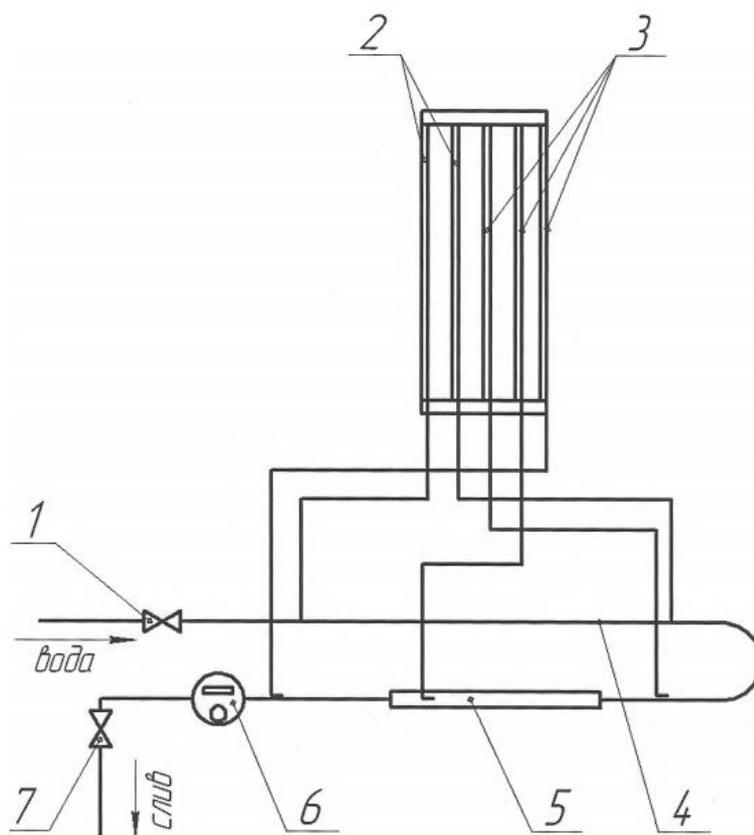


Рисунок 1.1 Схема экспериментальной установки

Установка состоит из расходного (1) и сливного (7) кранов, жидкостных манометров (2) и (3 – сумма статического и скоростного напоров), экспериментального участка трубопровода для изучения сопротивлений трения (4) (внутренний диаметр 8 мм, длина 832 мм) и местных сопротивлений (5), счетчика воды (6).

При открытии кранов (1) и (7) вода проходит через установку и попадает в емкость для слива. Расход воды измеряется счетчиком, а сопротивление трения трубопровода и местные сопротивления – разностью уровней ( $h$ ) по показаниям манометров (2) и (3).

### Последовательность выполнения работы

1. Включить лабораторный стенд.

2. Открыть кран слива (7) и, приоткрыть кран (1) до появления на манометрах (2) уровня жидкости.

3. Определить за какое время пройдет 1 м<sup>3</sup> жидкости по показаниям счетчика воды (6).

4. Записать в протокол испытаний значения времени и высоту столба жидкости по манометрам 2.

5. Выполнить работы по п. 2-4 последовательно еще для четырех значений расхода (последнее значение снимается при максимальном открытии крана (1)).

6. Закрыть кран (1).

7. Подождать пока стечет жидкость с манометров (2), закрыть кран слива (7) и выключить лабораторный стенд.

#### Обработка данных

1. Вычислить экспериментальные значения коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda_{\text{э}}$  по экспериментальным данным для всех реализованных значений параметров. Использовать для этого формулы:

$$\lambda_{\text{э}} = \frac{\Delta h}{\frac{l}{d} \cdot \alpha \cdot \frac{v^2}{2g}} = \frac{h_1 - h_2}{\alpha \cdot v^2} \cdot \frac{2g \cdot d}{l} \quad (1.1)$$

$$v = \frac{4Q}{\pi \cdot d^2} \quad (1.2)$$

2. Вычислить расчетные значения коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda_{\text{р}}$  по формулам

$$\lambda_{\text{р}} = 0,32/Re^{0,25} \quad \text{при } 2320 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5 \quad (1.3)$$

$$\lambda_{\text{р}} = 0,64/Re \quad \text{при } Re < 2320 \quad (1.4)$$

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (1.5)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости (по графику) рисунок 1.2.

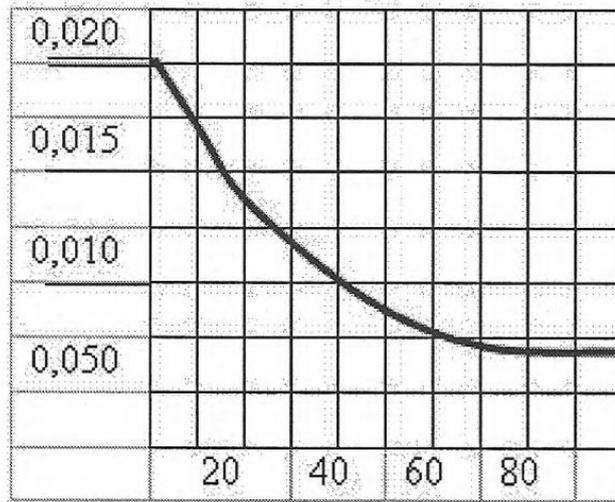


Рисунок 1.2 Зависимость кинематической вязкости воды от температуры

3. Занести все полученные результаты в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты измерений

№	Измеряемые параметры				Вычисляемые параметры					
	V, м <sup>3</sup>	t, с	h <sub>1</sub> , мм.вод.ст	h <sub>2</sub> , мм.вод.ст	Q, м <sup>3</sup> /с (Q= V/t)	Δh, мм.вод.ст	v, м/с	λ <sub>э</sub>	Re	λ <sub>р</sub>
1										
2										
3										
4										
5										

4. Сравнить экспериментальные и расчетные значения коэффициентов трения.

5. По средним значениям вычислить экспериментальные и расчетные потери гидравлического напора на трение  $\Delta P_T$ .

#### Контрольные вопросы

1. Чем различаются местные и распределенные по длине трубопровода сопротивления?

2. Какие виды течения жидкости различают?

3. Какие величины входят в критерий Рейнольдса и в чем заключается его физический смысл?

4. Каков физический смысл коэффициентов сопротивления?

## Лабораторная работа № 2

### «Исследование местных гидравлических сопротивлений»

*Цель работы:* повышение уровня знаний о гидравлических сопротивлениях при движении жидкости по трубам, приобретение навыков их самостоятельного определения.

*Задачи работы:*

1. Закрепить сведения о видах гидравлических сопротивлений и способах их определения.
2. Измерить местное сопротивление в трубе.
3. Сравнить экспериментальные и расчетные данные.

#### Общие сведения

Существует два вида потерь гидравлического напора при движении жидкости: потери на трение при движении по прямым участкам трубопроводов и потери на вихреобразование при каждом изменении конфигурации проходного сечения. Первые их них называют потерями на трение ( $\Delta P_T$ ), а вторые – потерями на местные сопротивления ( $\Delta P_M$ ), т.е.

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_M \quad (2.1)$$

Потери на местные сопротивления определяются формулой Вейсбаха, как часть динамического напора потока перед сопротивлением:

$$\Delta P_M = \xi \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2.2)$$

где  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – скорость движения жидкости по трубопроводу перед местным сопротивлением, м/с.

Коэффициент местного сопротивления ( $\xi$ ) зависит от критерия Рейнольдса и от конфигурации проходного сечения в устройстве, являющимся местным сопротивлением.

#### Описание лабораторной установки

Схема блока лабораторной установки представлена на рисунке 2.1.

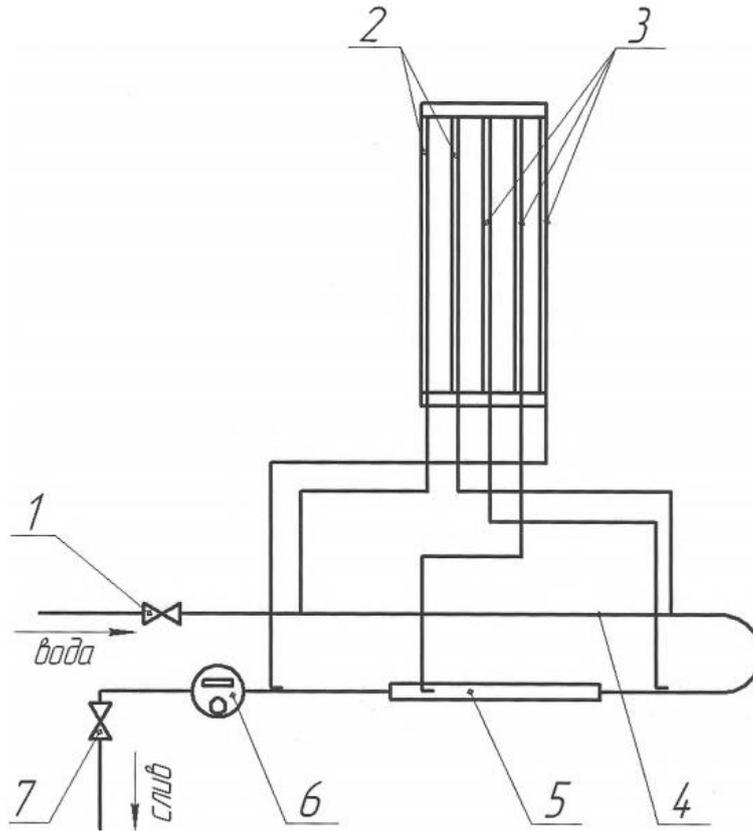


Рисунок 2.1 Схема экспериментальной установки

Блок установки состоит из расходного (1) и сливного (7) кранов, жидкостных манометров (2) и (3 – сумма статического и скоростного напоров), экспериментального участка трубопровода для изучения сопротивлений трения (4) (внутренний диаметр 8 мм, длина 832 мм) и местных сопротивлений (5), счетчика воды (6).

При открытии кранов (1) и (7) вода проходит через установку и попадает в емкость для слива. Расход воды измеряется счетчиком, а сопротивление трения трубопровода и местные сопротивления – разностью уровней ( $h$ ) по показаниям манометров (3), регистрирующих сумму статического и скоростного напоров.

#### Последовательность выполнения работы

При работе установки вода насосом подается в исследуемый трубопровод (5) переменного сечения ( $d_1 = 8$  мм;  $d_2 = 16$  мм). Такая конфигурация трубопровода приводит к образованию местных

сопротивлений. Расход, пройденной через трубопровод жидкости, определяется по показаниям счетчика (6).

1. Включить лабораторный стенд.
2. Открыть кран слива (7) и, приоткрыть кран (1) до появления на манометрах (2) уровня жидкости.
3. Определить за какое время пройдет  $1 \text{ м}^3$  жидкости по показаниям счетчика воды (6).
4. Записать в протокол испытаний значения времени и высоту столба жидкости по манометрам 3.
5. Выполнить работы по п. 2 – 4 последовательно еще для четырех значений расхода (последнее значение снимается при максимальном открытии крана (1)).
6. Закрыть кран (1).
7. Подождать пока стечет жидкость с манометров (3), закрыть кран слива (7) и выключить лабораторный стенд.

#### Обработка данных

1. Вычислить экспериментальные значения коэффициента местного сопротивления  $\xi_э$  по экспериментальным данным для всех реализованных значений параметров. Использовать для этого формулы:

$$\xi_э = \frac{2 \cdot g \cdot h_m}{v^2} \quad (2.3)$$

где  $v$  – значение скорости течения жидкости, м/с;  
для области внезапного расширения:

$$v = \frac{4Q}{\pi \cdot d_1^2} \quad (2.4)$$

для области внезапного сужения:

$$v = \frac{4Q}{\pi \cdot d_2^2} \quad (2.5)$$

2. Вычислить расчетные значения коэффициента местного сопротивления  $\xi_p$  по формулам:

$$\xi_{p\text{расш}} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \quad (2.6)$$

$$\xi_{рсуж} = \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right) / 2 \quad (2.7)$$

3. Занести все полученные результаты в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты измерений

№	Измеряемые параметры					Вычисляемые параметры						
	V, м <sup>3</sup>	t, с	h <sub>1</sub> , мм.вод. ст	h <sub>2</sub> , мм.вод. .ст	h <sub>3</sub> , мм.вод. .ст	Q, м <sup>3</sup> /с	υ <sub>суж</sub> , м/с	υ <sub>расш</sub> , м/с	ξ <sub>эсуж</sub>	ξ <sub>эрасш</sub>	ξ <sub>рсуж</sub>	ξ <sub>ррасш</sub>
1												
2												
3												
4												
5												

4. Сравнить экспериментальные и расчетные значения коэффициентов сопротивления.

#### Контрольные вопросы

1. Чем различаются местные и распределенные по длине трубопровода сопротивления?
2. Какие виды течения жидкости различают?
3. Какие величины входят в критерий Рейнольдса и в чем заключается его физический смысл?
4. Каков физический смысл коэффициентов сопротивления?

#### Лабораторная работа № 3

##### «Исследование преобразования форм энергии струи жидкости»

*Цель работы:* повышение уровня знаний о движении жидкости в трубопроводах, о преобразовании кинетической и потенциальной форм энергии в них.

*Задачи работы:*

1. Убедиться на опыте в переходе кинетической энергии потока в потенциальную и обратно.
2. Оценить полноту преобразования форм энергии и связанные с этим потерями на гидравлические сопротивления

3. Вычислить параметры преобразования форм энергии на отдельных участках экспериментального трубопровода и сравнить результаты с экспериментальными данными.

#### Общие сведения

Для реальной жидкости уравнение Бернулли имеет вид

$$\alpha \frac{\rho \cdot v^2}{2} + P + \rho \cdot h \cdot g + \Delta P_{\Pi} = P^* = const \quad (3.1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – скорость движения жидкости, м/с;

$P$  – статическое давление, Па;

$h$  – нивелирная высота жидкостной струи над уровнем ее отсчета, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\Delta P_{\Pi}$  – потери давления на рассматриваемом участке, Па;

$\alpha$  – коэффициент кинетической энергии (коэффициент Кориолиса), определяемый различиями средних по сечению местных скоростей течения жидкости;

$P^*$  – полное давление.

Уравнение Бернулли называют также основным уравнением гидродинамики, имеющим следующий физический смысл: «Статическое давление жидкости, текущей по трубе, больше там, где скорость движения жидкости меньше, и наоборот». Это уравнение названо именем швейцарского физика и математика Даниила Бернулли.

Часто уравнение Бернулли записывают в несколько ином виде

$$\alpha \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + h = H = const \quad (3.2)$$

где  $\alpha \frac{v^2}{2g}$  – скоростная высота столба жидкости, являющаяся мерой скоростного напора струи жидкости, м;

$\frac{P}{\rho g}$  – пьезометрическая высота столба жидкости в струе, характеризующая статическое давление, м;

$h$  – нивелирная высота струи над нулевым уровнем отсчета;

$H$  – полная гидравлическая высота (полное давление жидкости), м.

Это уравнение имеет следующий физический смысл: «Полная гидравлическая высота столба жидкости, характеризующего его полное давление, складывается из суммы скоростной, статической и нивелирной высоты и не изменяется при течении жидкости». Полная механическая энергия жидкости не исчезает, а лишь перераспределяется между указанными тремя составляющими уравнения. Если скоростной напор потока перевести в статическое давление путем торможения струи, то давление в этом месте будет равно полному давлению.

### Описание лабораторной установки

Принципиальная схема установки для иллюстрации уравнения Бернулли представлена на рисунке 3.1.

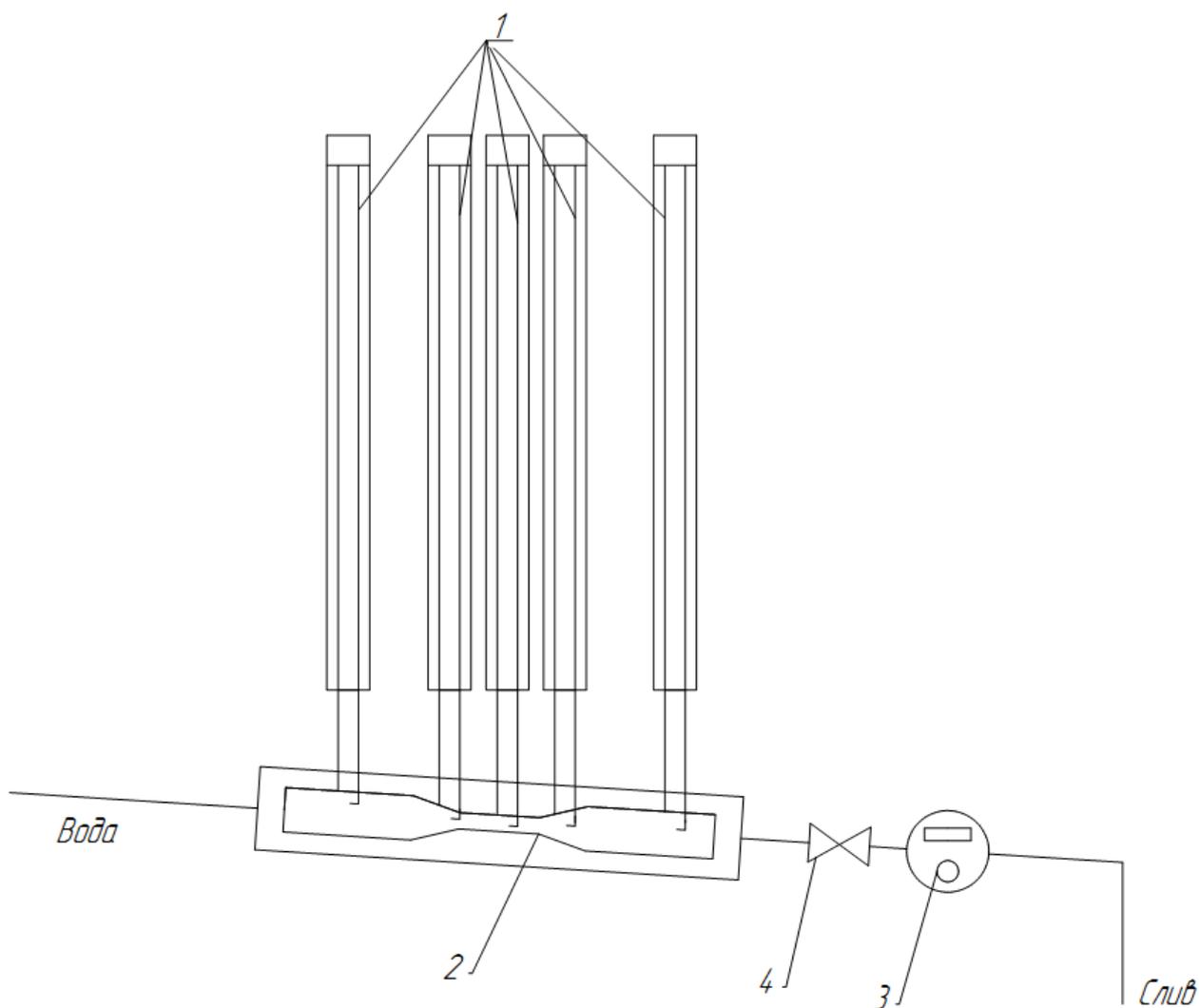


Рисунок 3.1 Схема экспериментальной установки

Основной элемент установки – это плоский трубопровод переменного сечения (2).

При работе установки вода из напорного резервуара поступает в трубопровод (2) и при открытом кране (4) попадает в емкость для слива. Расход жидкости считают по показаниям счетчика для воды (3).

В пяти наиболее характерных сечениях трубопровода установлены по две измерительные трубки (1). Левые трубки являются трубками пьезометрического напора, правые – полного напора.

#### Последовательность выполнения работы

Перед началом работы необходимо ознакомиться с методическими указаниями, проверить исправность установки и отсутствие течей.

1. Открыть кран слива (4).
2. Установить расход жидкости, обеспечивающий максимальную разницу высоты столба жидкости между пьезометрическим и полным напором.
3. Занести результаты измерений в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерений

Параметр	Единица измерения	Обозначение	Значения показателей по сечениям трубопровода				
			1	2	3	4	5
Объем	м <sup>3</sup>	V					
Время	с	t					
Эквивалентный диаметр проходных сечений	мм	d <sub>экв</sub>	12,4	12,4	8,0	12,4	12,4
Полный напор	мм.вод.ст.	h*					
Пьезометрический напор	мм.вод.ст.	h					
Скоростной напор	мм.вод.ст.	h <sub>v</sub> = h* - h					
Скорость потока	м/с	v					
Расход жидкости (экспериментальный)	м <sup>3</sup> /с	$Q = \frac{V}{t}$					
Расход жидкости (расчетный)	м <sup>3</sup> /с	Q <sub>p</sub>					

## Обработка данных

1. Вычислить экспериментальные значения скорости течения жидкости по среднему значению скоростного напора (для 3-го сечения) по формуле:

$$v = \sqrt{2gh_v} \quad (3.3)$$

2. Вычислить расчетные значения расхода жидкости  $Q_p$  для 3-го сечения по формуле:

$$Q_p = v \frac{\pi d_{\text{ЭКВ}}^2}{4} \quad (3.4)$$

3. Занести результаты измерений в таблицу 3.1.

4. По результатам измерений построить диаграмму уравнения Бернулли.

5. Сравнить расчетное и экспериментальное значения расхода жидкости в трубопроводе (для 3-го сечения).

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается физический смысл уравнения Бернулли?
2. Что такое «полное давление жидкости»?
3. Почему в сужающемся сопле давление, измеряемое по пьезометру, уменьшается?

## Лабораторная работа № 4

### «Определение режимов движения жидкости»

*Цель работы:* повышение уровня знаний в области определения и анализа режимов движения жидкостей и приобретение практических навыков по измерению основных параметров, характеризующих режим течения жидкости.

#### *Задачи работы:*

1. Закрепить знания по теории режимов течения жидкости и критериям, характеризующим это течение.
2. Ознакомиться со способом определения критериев, характеризующих движение жидкости и их зависимостями.

## Общие сведения

Существуют два режима движения жидкости – ламинарный и турбулентный.

При ламинарном режиме частицы жидкости перемещаются по направлению движения без поперечного перемешивания. Это спокойное, упорядоченное течение, при котором отдельные струйки жидкости движутся параллельно друг другу.

При турбулентном режиме частицы жидкости перемещаются по случайным искривленным траекториям, при этом имеют место поперечные пульсации скорости и давления и гораздо большие затраты энергии на перемещение жидкости. Это беспорядочное, хаотическое движение.

Режим движения жидкости в трубопроводе устанавливается расчетным путем по значению безразмерного числа – критерия Рейнольдса.

### Описание лабораторной установки

Схема блока лабораторной установки представлена на рисунке 4.1.

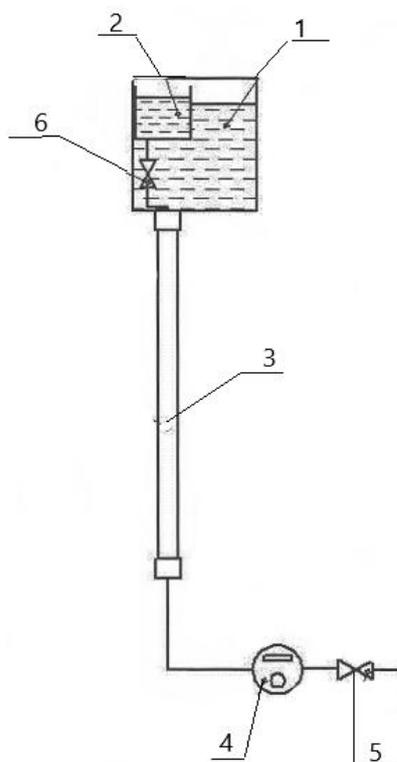


Рисунок 4.1 Схема экспериментальной установки

Она состоит из напорного резервуара (1), резервуара с подкрашенной жидкостью (2), вертикального стеклянного трубопровода (3) диаметром 18 мм, счетчика воды (4), кранов (5) и (6) для слива.

Вода из напорного резервуара поступает в стеклянный трубопровод. Для регулирования скорости движения жидкости установлен кран. в центр водяного потока поступает подкрашенная жидкость. Для определения расхода установлен счетчик воды.

В процессе проведения эксперимента ведется наблюдение за поведением подкрашенной жидкости при разных скоростях движения воды.

#### Последовательность выполнения работы

1. Включить лабораторный стенд.
2. Приоткрыть кран слива (6) и, приоткрывая кран (5) наблюдать за режимами движения жидкости в стеклянном трубопроводе (3).
3. Установить визуально ламинарный и турбулентный режим движения. При ламинарном режиме струйка подкрашенной жидкости движется параллельно оси трубопровода и не смешивается с водой. При турбулентном – струйка подкрашенной воды пропала, жидкость перемешалась с водой.
4. Снять значения расхода воды по показаниям счетчика (4).

#### Обработка данных

1. Вычислить для каждого опыта значение скорости течения жидкости по формуле:

$$v = \frac{4Q}{\pi \cdot d^2} \quad (4.1)$$

где  $v$  – значение скорости течения жидкости, м/с;

2. Определить экспериментальное значение числа Рейнольдса по формуле:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (4.2)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости (по графику из лабораторной работы № 1).

3. Сравнить результаты экспериментальных и теоретических исследований.

4. Занести все полученные результаты в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерений

№	Измеряемые параметры		Вычисляемые параметры			
	V, м <sup>3</sup>	t, с	Q, м <sup>3</sup> /с	v, м/с	Re	Режим движения (визуально)
1						
2						

#### Контрольные вопросы

1. Какие существуют режимы течения жидкости?
2. Каковы границы областей турбулентного и ламинарного течений жидкости?
3. Как определить критерий Рейнольдса?

#### Лабораторная работа № 5

##### «Гидродинамика псевдооживленного слоя»

*Цель работы:* практическое ознакомление с устройством и работой установки с псевдооживленным слоем зернистого материала.

*Задачи работы:*

1. Экспериментальным путем определить зависимости  $\Delta P_{сл} = f(\omega)$  и построение кривой псевдооживления.
2. Определить скорости начала псевдооживления экспериментальным и расчетным способами.

#### Общие сведения

Процесс псевдооживления представляет собой гидродинамическое взаимодействие псевдооживляющего потока (газа или жидкости) со слоем твердых частиц, при котором последние приобретают подвижность относительно друг друга за счет обмена энергией с псевдооживляющим потоком. При этом образуется псевдооживленный слой.

Свое название псевдооживленный слой получил за сходство с обычной жидкостью. Как и обычной жидкости, ему свойственны текучесть, вязкость, выполнение закона Архимеда.

В настоящее время псевдооживление применяют в большом числе химических, массообменных, гидромеханических, тепловых и механических процессов (каталитические реакции, газификация топлива, обжиг сульфидных руд, сушка, очистка, адсорбция паров и газов, обогащение, классификация, смешение, транспортирование и т. д.).

Широкое внедрение псевдооживленного слоя в промышленное производство объясняется такими его важными свойствами, как выравнивание полей температур и концентраций в объеме технологических аппаратов, максимальное развитие поверхности взаимодействия между газом и зернистым материалом (поверхности фазового контакта), возможность перемещения зернистых материалов в псевдооживленном состоянии, постоянное гидравлическое сопротивление слоя во всем диапазоне скоростей псевдооживления, простота конструктивного оформления технологических аппаратов с псевдооживленным слоем и возможность автоматизации их работы.

Наряду со значительными достоинствами, псевдооживленному слою свойственны следующие недостатки: уменьшение текущей движущей силы процесса, вызванное выравниванием концентрационных и температурных полей, возможность проскока значительных количеств газа без достаточного контакта с твердым материалом, возможность эрозионного износа при трении твердых частиц о стенки аппаратов, возникновение электростатических зарядов при трении диэлектрических частиц друг с другом, необходимость дополнительно устанавливать мощные газоочистные устройства и т. д.

*Особенности гидродинамики псевдооживленного слоя  
(для случая псевдооживления газом)*

Если через слой зернистого материала, расположенного на газопроницаемой решетке, пропускать поток газа, то сопротивление слоя будет зависеть от скорости газа.

Различают фиктивную и истинную скорость газа. Фиктивной называют среднюю скорость газа в поперечном сечении незаполненного аппарата, т.е.

$$\omega = \frac{V}{f} \quad (5.1)$$

где  $V$  – объемный расход газа, прошедшего через аппарат;

$f$  – площадь поперечного сечения аппарата.

Истинная скорость газа  $\omega_{\text{ист}}$  – это средняя скорость газа в промежутках между частицами псевдооживленного слоя. Истинная скорость всегда больше фиктивной скорости. Определение истинной скорости затруднительно, поэтому в расчетах обычно используют фиктивную скорость газа.

Зависимость между гидравлическим сопротивлением псевдооживленного слоя и фиктивной скоростью называют кривой псевдооживления (рисунок 5.1). Характер кривой псевдооживления легко установить экспериментально, измеряя перепад давления  $\Delta P$  на участке псевдооживленного слоя высотой  $H$  при различных значениях скорости газа.

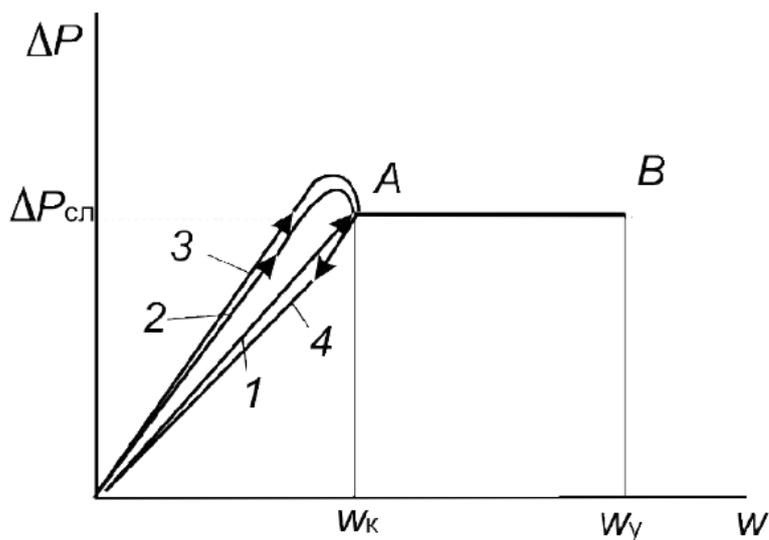


Рисунок 5.1 Кривые псевдооживления

При постепенном увеличении скорости газа от 0 до некоторого критического значения  $\omega_k$  наблюдается процесс фильтрования газа через слой неподвижных частиц зернистого материала. На кривой идеального псевдооживления монодисперсных частиц процессу фильтрования соответствует восходящая ветвь (рисунок 5.1, кривая 1). При фильтровании перепад давления на слое возрастает с увеличением скорости газа.

При скорости  $\omega_k$  начинается псевдооживление твердых частиц. Эту скорость называют первой критической скоростью, или скоростью начала псевдооживления.

Процесс псевдооживления осуществляют в интервале скоростей  $\omega_k < \omega < \omega_y$  (рисунок 5.1, участок АВ). В этом интервале скоростей перепад давления на слое остается постоянным. При скорости  $\omega_y$  (точка В) начинается унос частиц. Поэтому скорость  $\omega_y$  называют скоростью уноса, или второй критической скоростью. Скорости  $\omega_k$  и  $\omega_y$  важно знать, так как они определяют диапазон рабочих скоростей аппаратов с псевдооживленным слоем.

#### *Порозность слоя зернистого материала*

Рыхлость (плотность) упаковки частиц слоя зернистого материала характеризует порозность (пористость).

Порозность слоя твердых частиц  $\varepsilon$  есть объемная доля пустот в слое

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{сл}} - V_{\text{т}}}{V_{\text{сл}}} \quad (5.2)$$

где  $V_{\text{сл}}$  и  $V_{\text{т}}$  – соответственно объем слоя и объем твердых частиц в нем.

Порозность неподвижного слоя  $\varepsilon_0$  зависит от формы, фракционного состава, размера и способа упаковки частиц, и не зависит от скорости газа.

Для неподвижного слоя сферических частиц одинакового размера (монодисперсный слой частиц) независимо от их диаметра принимают  $\varepsilon_0 \approx 0,4$ . От величины порозности зависит гидравлическое сопротивление

неподвижного слоя и, следовательно, крутизна реальной кривой псевдооживления на участке фильтрования.

При более плотной упаковке (меньшей порозности) сопротивление слоя несколько выше и восходящая ветвь идет несколько круче (рисунок 5.1, кривая 3), чем при более рыхлой (рисунок 5.1, кривая 2).

Изменение порозности объясняет так называемый фильтрационный гистерезис – расхождение кривых  $\Delta P = f(w)$  на участке фильтрования при увеличении и уменьшении скорости: порозность неподвижного слоя до псевдооживления (рисунок 5.1, кривые 1, 2, 3) за счет самоуплотнения оказывается ниже, чем после возврата из псевдооживления (рисунок 5.1, кривая 4).

Порозность псевдооживленного слоя, в отличие от порозности неподвижного слоя, зависит от скорости газа и при ее увеличении возрастает от  $\epsilon_0$  до 1.

#### *Расчет скорости начала псевдооживления*

*(для случая сферических частиц одинакового диаметра)*

Для определения первой критической скорости (скорости начала псевдооживления) используют динамическое условие возникновения псевдооживленного слоя.

Согласно этому условию псевдооживление наступает, когда сила гидравлического сопротивления слоя станет равна весу всех частиц  $G_{сл}$  за вычетом архимедовой силы  $G_A$ :

$$\Delta P_{сл} = G_{сл} - G_A \quad (5.3)$$

где  $\Delta P_{сл}$  – перепад давлений на слое в момент начала псевдооживления (рисунок 5.1, точка А).

В реальных условиях в момент перехода слоя в псевдооживленное состояние наблюдается пик (скачок) давления, обусловленный необходимостью затраты дополнительной энергии на преодоление сил сцепления между частицами. Величина пика давления определяется плотностью первоначальной упаковки частиц, их формой, фракционным

составом, состоянием их поверхности. Из-за скачка давления реальные кривые псевдооживления (рисунок 5.1, кривые 2, 3) отличаются от идеальной (рисунок 5.1, кривая 1).

Выражая в уравнении (5.3)  $G_{\text{сл}}$  и  $G_A$  через объемы слоя и частиц, порозность  $\varepsilon_0$ , плотности материала частиц  $\rho_T$  и газа  $\rho_r$ , получают

$$\Delta P_{\text{сл}} = \frac{V_T \rho_T g - V_r \rho_r g}{\frac{V_{\text{сл}}}{H_0}} = H_0 (\rho_T - \rho_r) (1 - \varepsilon_0) g \quad (5.4)$$

где  $H_0$  – высота неподвижного слоя;

$g$  – ускорение свободного падения.

Так как силы  $G_{\text{сл}}$  и  $G_A$  от скорости газа не зависят, то из уравнения (5.3) следует, что при  $\omega_k < \omega < \omega_y$  сопротивление слоя  $\Delta P_{\text{сл}} = \text{const}$ .

Постоянство перепада давления в диапазоне скорости от  $\omega_k$  до  $\omega_y$  является ценным технологическим свойством псевдооживленного слоя, облегчающим в ряде случаев выбор вентилятора или насоса. Оно обеспечивается автоматическим расширением слоя (увеличением его порозности) при возрастании скорости газа.

Чтобы найти с помощью выражения (5.4) скорость  $\omega_k$ , следует выразить через нее перепад давления  $\Delta P_{\text{сл}}$ . Это можно сделать, учитывая, что на идеальной кривой псевдооживления фильтрование плавно переходит в псевдооживление. В силу этого при  $\omega = \omega_k$  еще остаются справедливыми закономерности фильтрования. Они состоят в следующем. Фильтрование газа через неподвижный слой частиц рассматривается как течение через систему параллельных извилистых каналов. При ламинарном течении среды можно воспользоваться формулой Кармана-Козени для удельного сопротивления слоя монодисперсных частиц

$$r = \frac{250\mu(1-\varepsilon_0)^2}{\psi^2 \cdot d^2 \cdot \varepsilon_0^3} \quad (5.5)$$

где  $d$  – диаметр частиц;

$\mu$  – вязкость фильтрующейся среды;

$\psi$  – коэффициент формы частиц;

$\varepsilon_0$  – насыпная порозность слоя.

Для точки перехода слоя частиц из неподвижного состояния в псевдооживленное (точка А, рис. 1) можно записать кинетический закон

$$\omega = \omega_k = \frac{\Delta P}{r \cdot H_0} = \frac{(\rho_T - \rho_r)(1 - \varepsilon_0)g\psi^2 \cdot d^2 \cdot \varepsilon_0^2}{250\mu(1 - \varepsilon_0)^2} \quad (5.6)$$

или

$$\omega_k = \frac{\psi^2 \cdot \varepsilon_0^2}{250(1 - \varepsilon_0)} \frac{gd^2(\rho_T - \rho_r)}{\mu} \quad (5.7)$$

Формулу (5.7) можно представить в критериальном виде. Умножая обе её части на  $\frac{d\rho_r}{\mu_r}$ , получим

$$Re_k = B \cdot Ar \quad (5.8)$$

$$B = \frac{\psi^2 \cdot \varepsilon_0^3}{250(1 - \varepsilon_0)};$$

$$Re_k = \frac{w_k \cdot d \cdot \rho_r}{\mu_r} - \text{число Рейнольдса, соответствующее } \omega_k;$$

$$Ar = \frac{g \cdot d^3 \cdot \rho_r \cdot (\rho_T - \rho_r)}{\mu_r^2} - \text{критерий Архимеда.}$$

Формула (5.7) пригодна для ламинарного режима. Для всех режимов фильтрования в монодисперсном слое скорость начала псевдооживления можно рассчитать по критериальной формуле Годеса

$$Re_k = \frac{Ar}{1400 + 5.22\sqrt{Ar}} \quad (5.9)$$

По формулам (5.7) и (5.8) можно рассчитать и первую критическую скорость  $\omega_k$ , если известна величина постоянной В.

Постоянную В определяют экспериментально или на основании математических моделей течения через пористый слой. В таблице 5.1 приведены значения В по данным различных исследователей, соответствующие  $\varepsilon_0 = 0,4$ .

Таблица 5.1 – Значения постоянной В

№ п/п	Источник информации	Значение постоянной В
1	Модель Пуазейля-Гагена: каналы в слое имеют длину $l_k = H_0$ и круглое сечение	$1,48 \cdot 10^{-3}$
2	Литературные данные	$0,43 \cdot 10^{-3}$

3	Экспериментальные данные Эргана	$0,71 \cdot 10^{-3}$
4	Модель Кармана-Козени: учитывается извилистость каналов	$0,59 \cdot 10^{-3}$

### Описание установки

Изучение гидродинамики псевдооживленного слоя и построение кривой псевдооживления опытным путем осуществляют на лабораторной установке, изображенной на рисунке 5.2.

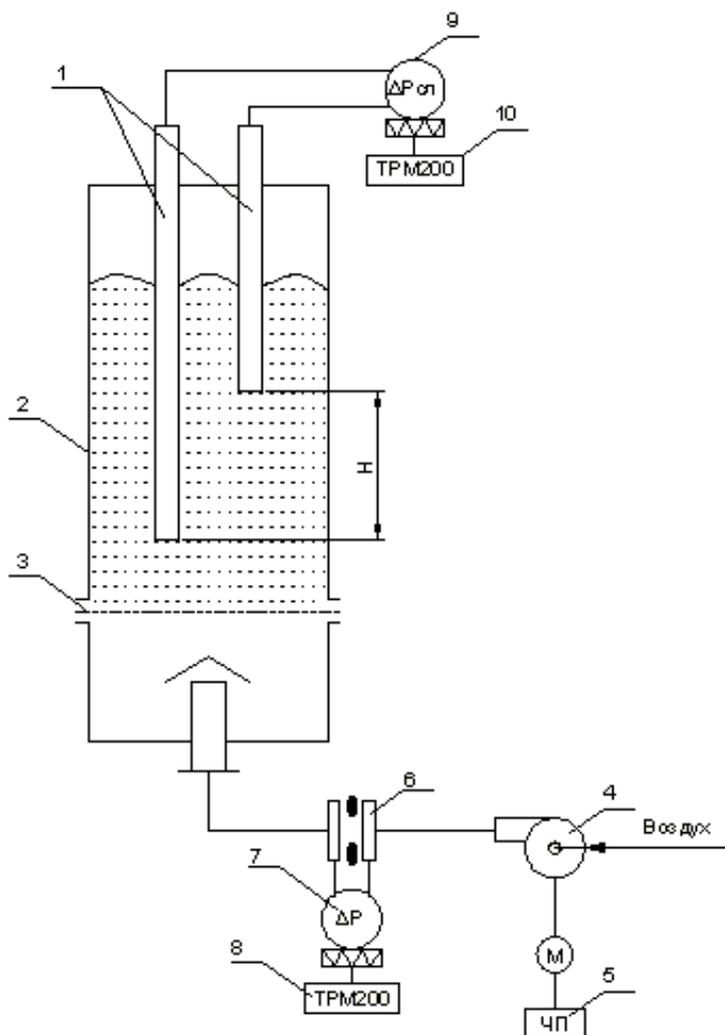


Рисунок 5.2 Схема экспериментальной установки:

- 1 – пьезометрические трубки; 2 – царга; 3 – газораспределительная решетка;  
 4 – газодувка; 5 – частотный преобразователь; 6 – измерительная диафрагма;  
 7 – преобразователь давления для расхода воздуха; 8 – вторичный прибор  
 «расход Воздуха»; 9 – преобразователь давления  $\Delta P_{сл}$ ; 10 – вторичный  
 прибор  $\Delta P_{сл}$

Установка состоит из стеклянной царги 2, имеющей внутренний диаметр  $D_{\text{ап}} = 150\text{мм}$ . Внизу аппарата установлена газораспределительная решетка 3, конструкция которой исключает провал твердых частиц.

В качестве псевдоожижающего агента используют воздух, который подают под газораспределительную решетку с помощью газодувки 4. Расход воздуха регулируют изменением числа оборотов двигателя газодувки с помощью частотного преобразователя 5.

Объемный расход воздуха определяется по перепаду давления  $\Delta P$  на измерительной диафрагме 6. Перепад давления на диафрагме подаётся на преобразователь давления 7, который преобразует этот перепад в электрический сигнал 4 – 20 мА, измеряемый и масштабируемый вторичным прибором 8.

Зернистый слой состоит из сферических стеклянных частиц диаметром  $d = 1,2\text{ мм}$ , плотностью  $\rho_{\text{т}} = 2560\text{ кг/м}^3$ .

В слой опущены две пьезометрические трубки 1, трубки отбора давления, расстояние между концами которых  $H = 60\text{ мм}$ .

Пьезометрические трубки соединены с дифференциальным преобразователем давления 9. Преобразователь давления преобразует разность давлений в электрический сигнал 4 – 20 мА, который измеряется вторичным прибором 10.

#### Порядок проведения работы

При самостоятельной работе, получив разрешение преподавателя, необходимо:

1. Повернуть переключатель «Включение установки» и включить её, а переключатель выбора лабораторной работы установить в положение «Гидродинамика псевдоожиженного слоя».

2. Веньерное устройство изменения числа оборотов газодувки установить на начальное положение (определяется преподавателем), зафиксировать по цифровому прибору измеренный перепад давления между концами пьезометрических трубок ( $\Delta P_{\text{сл}}$ , Па).

3. Далее, увеличивая число оборотов газодувки венъерным устройством по порядку определённому преподавателем, фиксировать показания цифрового прибора для каждого его положения (15 – 20 положений). Сначала от начального положения до крайнего (прямой ход), затем всё повторить в обратной последовательности (обратный ход).

4. Изменяя расход воздуха, наблюдать за состоянием зернистого слоя.

5. Результаты эксперимента занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты измерений

№ п/п	Деления по шкале ручки регулирования расхода воздуха $\Delta P$ , Па	Перепад давления на измерительной диафрагме $\Delta P$ , Па	Объемный расход воздуха $V$ , м <sup>3</sup> /час	Фиктивная скорость газа $\omega$ , м/с	Перепад давления на участке слоя при прямом ходе $\Delta P_{сл}$ , Па	Перепад давления на участке слоя при обратном ходе $\Delta P_{сл}$ , Па
1						
2						
...						
15						

### Обработка результатов измерений

Для каждой точки эксперимента по перепаду давления на измерительной диафрагме определяют объемный расход воздуха  $V = 2,8\sqrt{\Delta P}$ , м<sup>3</sup>/час.

По объемному расходу воздуха рассчитывают фиктивную скорость

$$\omega = \frac{4V}{\pi \cdot D_{ан}^2 \cdot 3600}, \text{ м/с.} \quad (5.10)$$

Пользуясь полученными экспериментальными данными строят графики  $\Delta P_{сл} = f(\omega)$  для прямого и обратного ходов. Анализируя графики, находят значение критической скорости начала псевдооживления  $\omega_k^{эксп}$ .

По формулам (5.7) и (5.8) при различных значениях  $V$  из таблицы 5.1 рассчитывают  $\omega_k^{расч}$ .

Аналогично по критериальной формуле Годеса (5.9) также рассчитывают  $\omega_k^{расч}$ .

Производят сопоставление расчетных и экспериментальных данных  $\omega_k$ .

### Контрольные вопросы

1. Что называют процессом псевдооживления твердых частиц? В чем заключается отличие псевдооживленного слоя от неподвижного?
2. Каковы области применения псевдооживленного слоя? Каковы достоинства и недостатки псевдооживленного слоя?
3. В чем заключается различие между фиктивной и истинной скоростью псевдооживающего агента?
4. График какой зависимости называют кривой псевдооживления? Каким процессам соответствуют отдельные участки этой кривой?
5. Что называется порозностью слоя? От чего зависит ее значение?
6. Чем объясняется постоянство перепада давления при изменении расхода газа (жидкости) через псевдооживленный слой?
7. От чего зависит перепад давления на псевдооживленном слое?

### Лабораторная работа № 6

#### «Исследование теплообменных явлений в псевдооживленном слое»

*Цель работы:* повышение уровня знаний о псевдооживленном слое.

*Задачи работы:*

1. Экспериментально определить зависимость между средним коэффициентом теплоотдачи от теплообменной поверхности к псевдооживленному слою  $\alpha$  и скоростью псевдооживающего потока  $\omega$ ,  $\alpha = f(\omega)$ .
2. Экспериментально найти значение оптимальной скорости газа  $\omega_{\text{опт.э}}$ , соответствующее максимальному значению  $\alpha_{\text{макс.э}}$ .
3. Рассчитать величины  $\omega_{\text{опт.р}}$  и  $\alpha_{\text{макс.р}}$  и сопоставить их с величинами  $\omega_{\text{опт.э}}$  и  $\alpha_{\text{макс.э}}$ , найденными опытным путем.

### Основные сведения

В химической промышленности используют процессы, в которых осуществляется взаимодействие между потоком газа и псевдооживленным слоем частиц твердых зернистых материалов. Часто такие процессы

сопровождаются теплообменом между зернистым материалом и теплообменными поверхностями внутри аппарата.

Теплообмен в аппаратах с псевдооживленным слоем протекает по двум направлениям:

1) Теплообмен между теплообменной поверхностью, потоком псевдооживляющего агента и твердыми частицами слоя;

2) Теплообмен между твердыми частицами псевдооживленного слоя и потоком псевдооживляющего агента.

Поскольку твердые частицы не выносятся из объема аппарата, то поток псевдооживляющего агента получает тепло как от теплообменной поверхности так и от поверхности твердых частиц слоя. Т.е. твердые частицы слоя совместно поверхностью теплообменника создают развитую псевдоповерхность теплообмена для потока псевдооживляющего агента.

В общем случае процесс теплоотдачи от теплообменной поверхности к псевдооживляющему агенту для стационарных условий может быть описан уравнением теплоотдачи (закон Ньютона)

$$Q = \alpha(t_{ст} - t_{па})F \quad (6.1)$$

где  $Q$  – количество тепла, переданное в единицу времени от теплообменной поверхности к псевдооживляющему агенту;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, отнесенный к единице теплообменной поверхности теплообменника;

$t_{ст}$  – температура теплообменной поверхности, контактирующей с псевдооживленным слоем;

$t_{па}$  – температура псевдооживленного агента;

$F$  – площадь теплообменной поверхности теплообменника.

Механизм переноса тепла от псевдооживленных твердых частиц к псевдооживляющему потоку газа включают в себя конвективную теплоотдачу между частицами и газом, а также нестационарный теплообмен внутри частицы посредством теплопроводности.

В работе объектом изучения является теплообмен между потоком горячего жидкого теплоносителя (вода) через змеевиковую теплообменную поверхность с газовым псевдоожижающим агентом (воздух) проходящего через слой зернистого материала находящегося сначала в неподвижном состоянии а затем в псевдоожиженном при различных расхода псевдоожижающего агента.

Рассмотрим установившийся процесс теплоотдачи от поверхности нагрева к слою зернистого материала при невысоких температурах. Лучистым теплообменом пренебрегаем вследствие невысоких температур поверхности и псевдоожиженного слоя.

При взаимодействии поверхности нагрева с фильтрующимся сквозь слой неподвижных частиц потоком омывающего газа теплообмен будет определяться следующими параллельно протекающими процессами:

1) теплопроводностью от поверхности нагрева к неподвижным частицам зернистого материала через точки контакта между поверхностью и частицами, а также через точки контакта между частицами;

2) теплоотдачей от поверхности нагрева и поверхности неподвижных частиц к омывающему их газу.

Интенсивность этих процессов теплообмена при неподвижных частицах зернистого материала мала вследствие ограниченного количества точек контакта поверхности нагрева с неподвижными частицами и частиц друг с другом, а также из-за наличия плохо проводящего тепло газового пограничного слоя вблизи поверхности теплообмена и поверхности неподвижных частиц.

При переходе неподвижного слоя в состояние псевдоожижения интенсивность теплоотдачи резко возрастает. Это связано с принципиальным изменением характера взаимодействия между слоем и погруженной в него поверхностью нагрева. В момент достижения газом критической скорости начала псевдоожижения  $\omega_{кр}$  частицы слоя за счет взаимодействия с потоком псевдоожижающего газа получают возможность хаотического движения,

перемещения друг относительно друга и относительно погруженной в слой поверхности нагрева.

При дальнейшем росте скорости газа интенсивность движения частиц возрастает, слой начинает расширяться и порозность его увеличивается. Визуально наблюдается вначале переход от неподвижного слоя к состоянию однородного псевдооживления (отсутствуют большие газовые пузыри, частицы перемешиваются слабо), а затем – к состоянию неоднородного псевдооживления (сквозь слой прорываются, в виде пузырей, значительные количества газа, частицы интенсивно перемешиваются). Движущиеся частицы получают тепло от поверхности теплообмена и транспортируют его в глубь основной массы псевдооживленного слоя. Теплообмен между движущимися частицами псевдооживленного слоя и поверхностью нагрева определяется следующими параллельно протекающими процессами:

- 1) теплоотдачей от поверхности нагрева через пограничный слой к потоку псевдооживляющего газа;
- 2) теплопроводностью от поверхности теплообмена к твердым частицам, которые отдельно или группами систематически соприкасаются с поверхностью теплообмена и снова уходят в глубь слоя.

Интенсивность этих процессов теплообмена различна.

Первый из указанных процессов, как и в случае неподвижного слоя, остается малоинтенсивным вследствие малой теплопроводности пограничного слоя газа. Второй процесс, наоборот, отличается высокой интенсивностью теплообмена, так как вследствие малой тепловой инерции большинства мелких частиц они интенсивно прогреваются, несмотря на кратковременность контакта с теплообменной поверхностью. Чем выше скорость псевдооживляющего газа, тем интенсивнее перемешивание частиц, выше частота встреч отдельных частиц или их групп с теплообменной поверхностью, т. е. тем интенсивнее отвод тепла от этой поверхности в глубь псевдооживленного слоя. Однако при дальнейшем повышении скорости псевдооживляющего агента интенсивность теплообмена начинает снижаться.

Это снижение связано со значительным расширением псевдооживленного слоя при больших скоростях псевдооживающего агента, увеличением порозности псевдооживленного слоя, т. е. с уменьшением концентрации твердых частиц у поверхности теплообмена. Такое уменьшение концентрации твердых частиц у теплообменной поверхности приводит к уменьшению частоты соприкосновения частиц с поверхностью и, соответственно, к снижению теплоотвода твердыми частицами.

Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от скорости газа  $\omega$  должна соответствовать характеру изменения интенсивности теплообмена с ростом скорости псевдооживающего агента.

Характерная зависимость  $\alpha = f(\omega)$ , полученная экспериментальным путем, приведена на графике (рисунке 6.1). На графике показано что при увеличении скорости газа  $w$  возрастает и  $\alpha$  до некоторого предельного значения  $\alpha_{\max}$ , соответствующего оптимальной скорости  $\omega_{\text{опт}}$ .

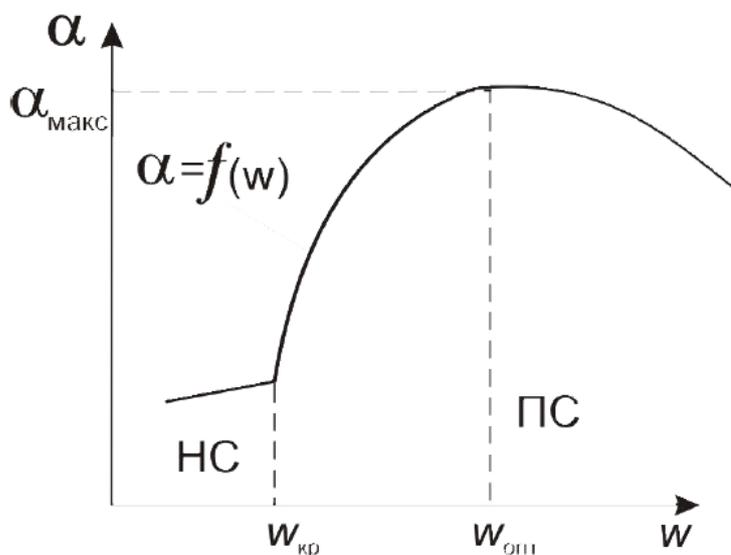


Рисунок 6.1 Типичный вид зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости оживающего агента (НС-неподвижный слой ( $\omega < \omega_{\text{кр}}$ ))

При дальнейшем увеличении скорости газа коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  начинает снижаться. Такой характер зависимости  $\alpha = f(\omega)$  наблюдается чаще всего для мелкозернистых материалов (эквивалентный диаметр  $d_3 = 80$  мкм) малой плотности. Для более крупных частиц высокой плотности зависимость

$\alpha = f(\omega)$  может описываться монотонно возрастающей кривой без экстремальных значений  $\alpha_{\max}$  и  $\omega_{\text{опт}}$ .

### Описание установки

Схема лабораторной установки приведена на рисунке 6.2.

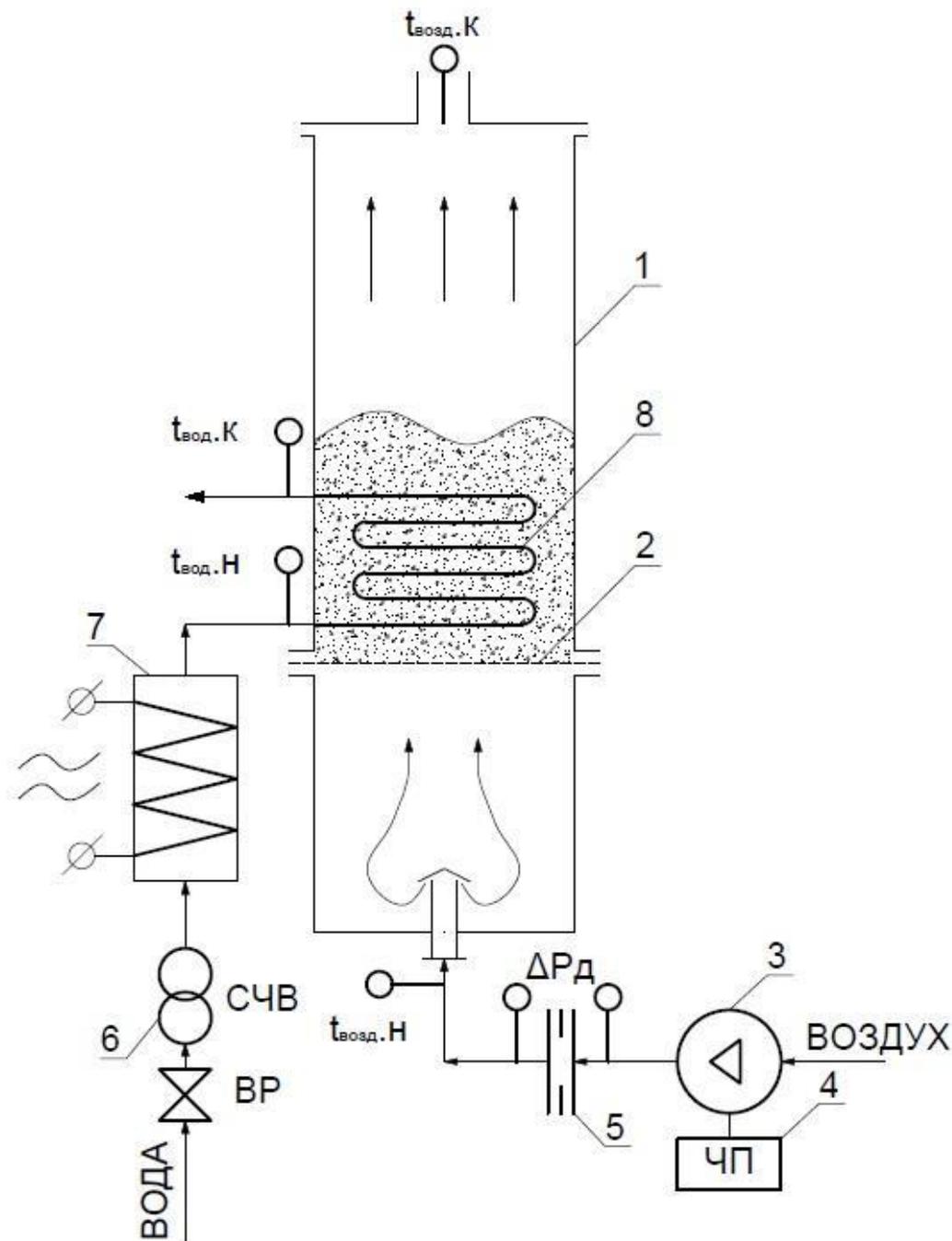


Рисунок 6.2 Схема экспериментальной установки:

- 1 – стеклянная царга; 2 – газораспределительная решетка; 3 – газодувка;
- 4 – частотный преобразователь; 5 – измерительная диафрагма;
- 6 – ультразвуковой расходомер; 7 – электрический проточный водонагреватель; 8 – змеевиковый теплообменник

Основной аппарат состоит из стеклянной царги 1, имеющей внутренний диаметр  $D = 150$  мм. Внизу аппарата установлена газораспределительная решетка 2, конструкция которой исключает провал твердых частиц.

На газораспределительной решетке размещается слой монодисперсного зернистого материала ( $d_z = 0,9$  мм).

В качестве псевдоожижающего агента используют воздух, который подают под газораспределительную решетку газодувкой 3. Расход воздуха регулируют с помощью частотного преобразователя 4 изменением числа оборотов электродвигателя газодувки. Замер расхода воздуха осуществляется по перепаду давления  $\Delta P_d$  на измерительной диаграмме 5, который преобразуется датчиком дифференциального давления в электрический сигнал, вторичный прибор ТРМ-200. В слое зернистого материала размещен змеевиковый теплообменник 8, изготовленный из медной трубки диаметром 10 мм, толщина стенки  $\delta = 1$  мм (6,5 витков, средний диаметр навивки 100 мм, площадь теплообмена  $F = 0,138$  м<sup>2</sup>).

В качестве теплоносителя используется вода, которая нагревается в проточном водонагревателе 7 до заданной температуры электрическими ТЭНами. Расход воды регулируется вентилем ВР, а измеряется с помощью ультразвукового расходомера 6 с импульсным выходом, вторичный прибор счетчик СИ-8.

Для измерения температуры воды и воздуха на входе ( $t_n^B, t_n^{B03D}$ ) и выходе ( $t_k^B, t_k^{B03D}$ ) из аппарата используются термометры сопротивления типа ТСМ-50М, вторичные приборы – ТРМ-200.

#### Порядок выполнения работы

1. Переключателем «Включение установки» на щите КИП комплексной лабораторной установки включить установку.

2. Переключатель «Выбор лабораторных работ» поставить в положение «Теплообмен ПС». Наблюдать свечение индикаторов измерительных приборов замера параметров.

3. Вентилем ВР установить необходимый расход воды по прибору СИ-8, л/час (остаётся неизменным во время экспериментов).

4. Включить нагрев воды кнопкой «Пуск/стоп».

5. Ступенчатым переключателем «Расход воздуха с «плавным» подрегулированием» установить начальный расход воздуха до начала псевдооживления (неподвижный слой, режим фильтрования ( $w < w_{кр}$ )).

6. По выходу процесса теплообмена на стационарный режим (3 – 4 мин), измеренные параметры процесса занести в таблицу 6.1.

7. Переход на новый режим работы осуществляют ступенчатым изменением расходы воздуха в описанном порядке.

Таблица 6.1 – Результаты измерений

№ п/п	Перепад давления на диафрагме $\Delta P_d$ , Па	Расход воздуха, $V_v, \text{м}^3/\text{час}$	Фиктивная скорость воздуха в аппарате, $w$ , м/с	Температура, $^{\circ}\text{C}$			
				Вода		Воздух	
				$t_H^B$	$t_K^B$	$t_H^{\text{возд}}$	$t_K^{\text{возд}}$
1							
2							
...							

Массовый расход воды  $W = \underline{\hspace{2cm}}$  кг/час =  $\underline{\hspace{2cm}}$  кг/с.

#### Обработка результатов измерений

Для всех режимов эксперимента определяют:

1. Фиктивную скорость воздуха в свободном сечении аппарата по уравнению расхода, с учетом того, что часть поперечного сечения аппарата занята корпусом змеевикового теплообменника.

$$\omega = \frac{4 \cdot V_v}{\pi \cdot [D^2 - (0.11^2 - 0.09^2)] \cdot 3600} \quad (6.1)$$

где  $D$  – внутренний диаметр аппарата, м;

$V_v$  – объемный расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

2. Определить количество теплоты  $Q_B$  (Дж/с), отданное водой в процессе теплообмена

$$Q_B = W \cdot C_B \cdot (t_H^B - t_K^B) \quad (6.2)$$

где  $C_B = 4190 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  – теплоёмкость воды;

$W$  – массовый расход воды, кг/с.

3. Определить количество теплоты

$$Q_{\text{возд}} = V \cdot \rho_{\text{возд}} \cdot C_{\text{возд}} \cdot (t_K^{\text{возд}} - t_H^{\text{возд}}) \quad (6.3)$$

где  $C_{\text{возд}} = 1005 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  – теплоёмкость воздуха;

$V$  – объемный расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;

$\rho_{\text{возд}} = 1,29 \cdot \frac{273}{T}$  – плотность воздуха в зависимости от температуры  $T$  [К]

( $T = t_{\text{возд}} \cdot \text{°C} + 273$ ,  $t_{\text{возд}} = \frac{t_H^{\text{возд}} + t_K^{\text{возд}}}{2}$ );

4. Определить теплотопери в окружающую среду

$$Q_{\text{потерь}} = Q_B - Q_{\text{возд}} \quad (6.4)$$

5. Используя основное уравнение теплопередачи

$$Q_{\tau} = K \cdot \Delta t_{\text{ср}} \cdot F \quad (6.5)$$

определяют коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{Q_{\tau}}{\Delta t_{\text{ср}} \cdot F} \quad (6.6)$$

где  $Q_{\tau} = Q_{\text{возд}}$  Дж/с – количество тепла, полученное воздухом в процессе теплообмена;

$\Delta t_{\text{ср}}$  – средняя движущая сила [°C], определяющая как среднелогарифмическая величина

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}} \quad (6.7)$$

или как среднеарифметическая величина

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\text{м}}}{2}, \text{ если } \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}} \leq 2, \quad (6.8)$$

где  $\Delta t_{\delta}$  и  $\Delta t_{\text{м}}$  – соответственно большая и меньшая разность температур между теплоносителем (вода) и хладагентом (воздух) при прямоточном движении сред ( $\Delta t_{\delta} = \Delta t_H^B - \Delta t_H^{\text{возд}}$ ,  $\Delta t_{\text{м}} = \Delta t_K^B - \Delta t_K^{\text{возд}}$ );

$F$  – площадь теплообмена змеевика, м<sup>2</sup>.

6. Коэффициент теплопередачи  $K$ , определяется через термические сопротивления

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (6.9)$$

где  $\frac{1}{\alpha_1}$  – термическое сопротивление от потока горячего теплоносителя к стенке змеевика ( $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи);

$\frac{\delta}{\lambda}$  – термическое сопротивление стенки ( $\delta = 0,001$  м;  $\lambda_{\text{меди}} = 384 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ );

$\frac{1}{\alpha_2}$  – термическое сопротивление от теплообменной поверхности к газовому потоку ( $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от стенки к газовому потоку).

По условиям проведения теплообменного процесса, агрегатного состояния сред, обменивающихся теплом, можно считать, что термическое сопротивление со стороны жидкости для всех режимов остается постоянным и пренебрежимо малым по сравнению с термическим сопротивлением в газовый поток, движущийся через слой зернистого материала. Пренебрежимо мало и термическое сопротивление стенки ( $\delta/\lambda = 0,001/384$ ), поэтому величина коэффициента теплопередачи  $K$ , характер его зависимости от скорости газового потока будет определяться величиной коэффициента теплоотдачи от теплообменной поверхности змеевика в газовый поток т.е. можно считать, что  $K \approx \alpha_2 = \alpha_{\text{экср}}$ .

7. Рассчитанные параметры для всех режимов псевдооживления заносятся в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Результаты вычислений

№ п/п	Фиктивная скорость воздуха в аппарате, $w$ , м/с	Количество тепла отданное водой, $Q_{\text{в}}$ , Дж/с	Количество тепла полученное воздухом, $Q_{\text{возд.}}$ , Дж/с	Потери тепла, $Q_{\text{потерь}}$ , Дж/с	Коэффициент теплопередачи, $K = \alpha_{\text{экср}}$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
1					
2					
...					

8. По полученным  $\alpha_{\text{эксп}}$  и  $\omega$  для различных режимов строят графическую зависимость  $\alpha_{\text{эксп}} = f(\omega)$ . По графику определяют значения  $\omega_{\text{опт.э}}$  и  $\alpha_{\text{макс.э}}$ .

9. Производят сравнения полученных экспериментальных и теоретических значений  $\omega_{\text{опт.р}}$  и  $\alpha_{\text{макс.р}}$  для значения диаметра частиц, применяемых в установке.

#### Контрольные вопросы

1. Какие виды теплообмена возможны в аппаратах с псевдооживленным слоем? Какой из них изучают в данной лабораторной работе?

2. Каким законом описывается теплоотдача от твердой поверхности в псевдооживленный слой?

3. Какими механизмами осуществляют перенос теплоты от твердого тела в псевдооживленный слой? Вклад какого из них более значителен?

4. Как рассчитывают движущую силу теплообменного процесса?

5. Из каких термических сопротивлений складывается общее термическое сопротивление процесса теплопередачи?

#### Лабораторная работа № 7

##### Определение напорно-расходной характеристики насоса

*Цель работы:* повышение уровня знаний о характеристиках насосов и способов их получения; приобретение навыков экспериментального определения характеристик насосов.

*Задачи работы:*

1. Определить значимость напорно-расходной характеристики насосов и способы её получения.

2. Определить напорно-расходную характеристику насоса Н1.

3. Построить графические характеристики центробежного насоса.

##### Основные сведения

Насос – гидравлическая машина, предназначенная для сообщения энергии жидкости с целью перемещения ее по трубопроводам или совершения механической работы.

Все насосы подразделяются на две основные группы динамические и объемные.

В динамических насосах сообщение энергии жидкости осуществляется за счет воздействия гидродинамических сил на незамкнутый объем жидкости.

В объемных насосах сообщение энергии жидкости осуществляется за счет периодического изменения замкнутого объема при попеременном сообщении его со вводом и выходом насоса.

Динамические насосы, в свою очередь, подразделяются на лопастные и насосы трения.

К лопастным относятся центробежные и осевые насосы. В центробежных насосах движение жидкости осуществляется от центра к периферии, а у осевых – в направлении оси насоса.

Насосы трения осуществляют перемещение жидкости за счет сил трения и инерции. К этому типу насосов могут быть отнесены вихревые, шнековые и струйные.

Группа объемных насосов включает в себя поршневые, плунжерные, диафрагменные, роторные различных типов, шестеренные и винтовые.

Работа насосов характеризуется его подачей, напором и КПД.

Подача насоса (расход жидкости)  $V$  – это объем жидкости, перемещаемый в единицу времени.

Напор  $H$  ( $\Delta p$ ) насоса – давление, сообщаемое насосом перемещаемой жидкости.

КПД насоса (полный) – отношение полезной мощности  $N_{\text{п}}$  к потребляемой мощности  $N_{\text{дв}}$ .

Характеристиками насосов являются зависимости создаваемого ими напора ( $H$ ) и КПД ( $\eta$ ) от расхода жидкости ( $V$ ) через них при постоянных оборотах ( $n$ ) приводного вала, т.е.

$$H = f(V) \text{ и } \eta = f(V) \text{ при } n = \text{const.}$$

Зависимость  $H = f(V)$  называется также напорно-расходной характеристикой насоса.

В настоящей работе исследуется напорно-расходная характеристика центробежного насоса.

Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рисунке 7.1.

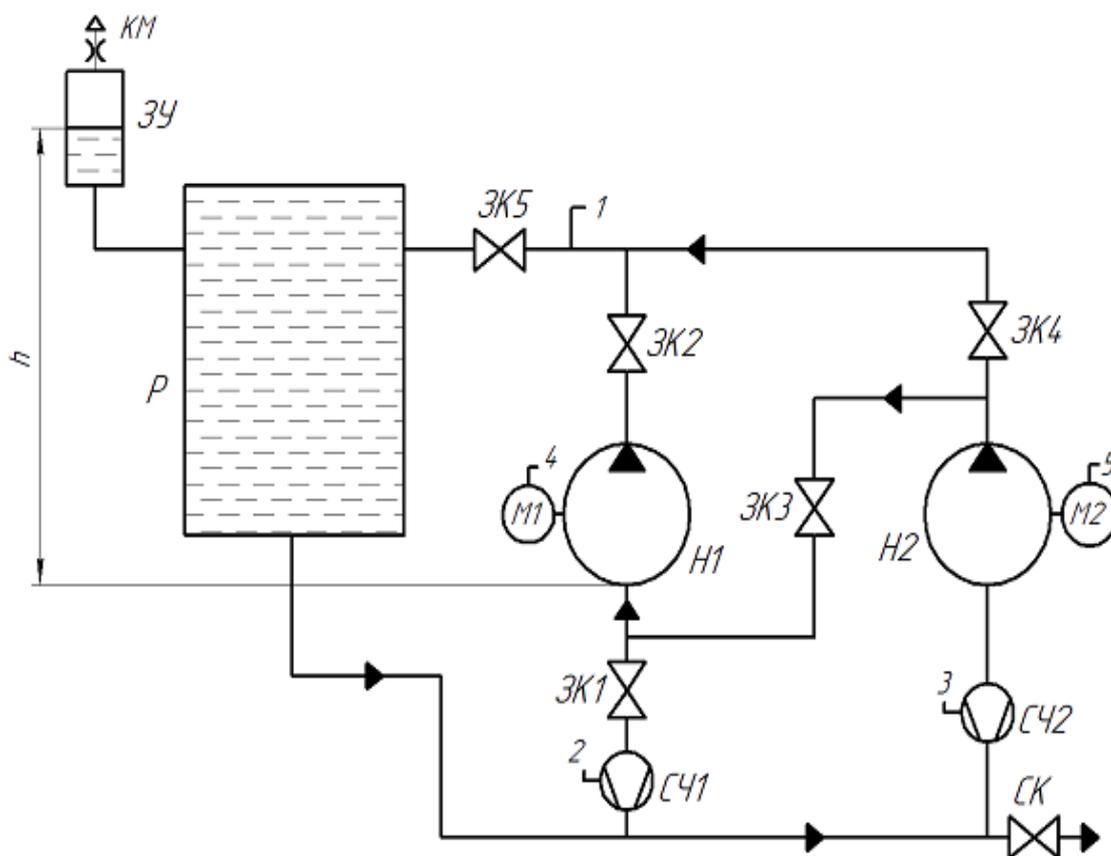


Рисунок 7.1 Схема лабораторного стенда:

Р – резервуар для жидкости; ЗУ – заливочное устройство с краном Маевского (КМ); СЧ – счетчик расхода жидкости с импульсным выходом;

Н1 – циркуляционный насос №1; Н2 – циркуляционный насос №2;

З – запорные краны; СК – сливной кран; 1 – датчик давления жидкости (кПа);

2 – расход жидкости через насос Н1 ( $V_1$ , л/мин); 3 – расход жидкости через насос Н2 ( $V_2$ , л/мин); 4 – мощность насоса №1 (Вт); 5 – мощность насоса №2 (Вт).

**Проверить!** аварийная кнопка «Стоп» должна находиться в отжатом положении. Для этого повернуть её по часовой стрелке (направление стрелками указано на кнопке).

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой лабораторной установки (рисунок 7.1) и расположением приборов. Оформить лабораторную работу и заготовить таблицу 1.1 для регистрации результатов испытаний.

2. Подготовить установку к испытаниям. Удостовериться, что сливной кран (СК) закрыт и уровень воды наблюдается в заливочном устройстве (ЗУ), в противном случае долить жидкость в систему. Подтеки не допускаются.

3. Подключить стенд к сети 220 В.

4. Включить питание стенда автоматом АВ «Сеть».

5. Подключить автоматизированный стенд к USB разъему компьютера и запустить программу Пуск → Программы → MeasLAB → «Испытание насосов».

6. Открыть краны подачи воды ЗК1, ЗК2, остальные закрыть.

7. Включить насос Н1, кнопкой ВК1.

8. Определить давление, развиваемое насосом Н1 при нулевой подаче.

9. При включенном насосе Н1, медленно приоткрывая кран ЗК5 и регулируя расход воды, снять показания при 5-ти различных значениях.

10. Результаты измерений занести в таблицу 5.1.

11. При включенном насосе Н1, медленно закрыть кран ЗК5.

12. Выключить насос Н1, кнопкой ВК1.

13. Закрыть краны подачи воды ЗК1, ЗК2, проверить чтобы все краны были закрыты.

## Обработка данных

Определить давление, создаваемое насосом в магистрали ( $\Delta p$ ) с учетом поправки на уровень воды в резервуаре (Па)

$$\Delta p = p_M - p_{ВХ} \quad (7.1)$$

где  $p_M$  – давление жидкости в нагнетательном трубопроводе, Па;

$p_{ВХ}$  – давление на входе в насос, создаваемое столбом жидкости в резервуаре, (Па)

$$p_{ВХ} = h \cdot \rho \cdot g, \quad (7.2)$$

где  $h$  – разность уровней воды в резервуаре и на входе в насос, м;

$\rho$  – плотность воды, 998 кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, 9,81 м/с<sup>2</sup>.

Напор насоса, м

$$H = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} \quad (7.3)$$

Определить полезную мощность, Вт

$$N_{\text{п}} = V \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad (7.4)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости при средней температуре, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$V$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с.

Вычислить мощность на валу насоса по формуле, Вт

$$N = N_{\text{дв}} \eta_{\text{дв}} \quad (7.5)$$

где  $N_{\text{дв}}$  – потребляемая мощность электродвигателем насоса, Вт;

$\eta_{\text{дв}}$  – КПД электродвигателя насоса, в среднем принимается  $\eta_{\text{дв}} = 0,85$ .

Рассчитать коэффициент полезного действия насоса

$$\eta = \frac{N_{\text{п}}}{N} \cdot 100 \quad (7.6)$$

Результаты расчетов занести в таблицу 7.1.

Таблица 7.1– Результаты измерений и вычислений

№ п/п	$p_{\text{м}}$ , кПа	$\Delta p$ , Па	$H$ , м	$V_1$ , л/мин	$N_{\text{дв}}$ , Вт	$N_{\text{п}}$ , Вт	$N$ , Вт	$\eta$ , %

По экспериментальным данным построить графические зависимости напорно-расходной характеристики насоса, потребленной мощности и КПД, (примерный вид приведен на рисунке 7.2).

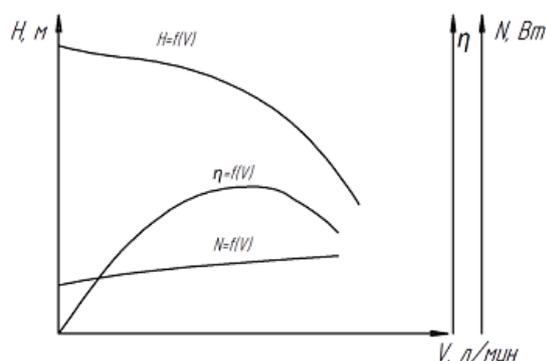


Рисунок 7.2 Характеристики центробежного насоса

### Контрольные вопросы

1. Что называется насосом?
2. Классификация насосов
3. Показатели, характеризующие работу насоса.
4. Что такое подача насоса?
5. Что такое напор насоса?
6. Что такое КПД насоса?
7. Что называется характеристикой насоса?
8. Что называется напорно-расходной характеристикой насоса?

### Лабораторная работа № 8

#### Исследование работы двух насосов с параллельным и последовательным соединением

*Цель работы:* повышение уровня знаний о работе группы насосов, работающих на общую линию; приобретение навыков экспериментального определения характеристик насосов.

*Задачи работы:*

1. Определить напорно-расходную характеристику каждого насоса.
2. Определить суммарную напорно-расходную характеристику двух параллельно соединенных насосов.
3. Определить суммарную напорно-расходную характеристику двух последовательно соединенных насосов.

## Основные сведения

На практике для увеличения напора или расхода жидкости применяют последовательное и параллельное соединение насосов.

Последовательное соединение насосов применяется для увеличения напора ( $H$ ) в тех случаях, когда один насос не может создать требуемого напора. Общий напор двух последовательно соединенных насосов равен (без учета КПД) сумме напоров обоих насосов, взятых при одном и том же расходе ( $V$ ). Суммарная характеристика (рисунок 8.1) насосов  $H_1 + H_2$  получается в результате сложения ординат кривых характеристик насосов I и II, где  $h_{\text{п}} = f(V)$  – зависимость изменения общих потерь напора.

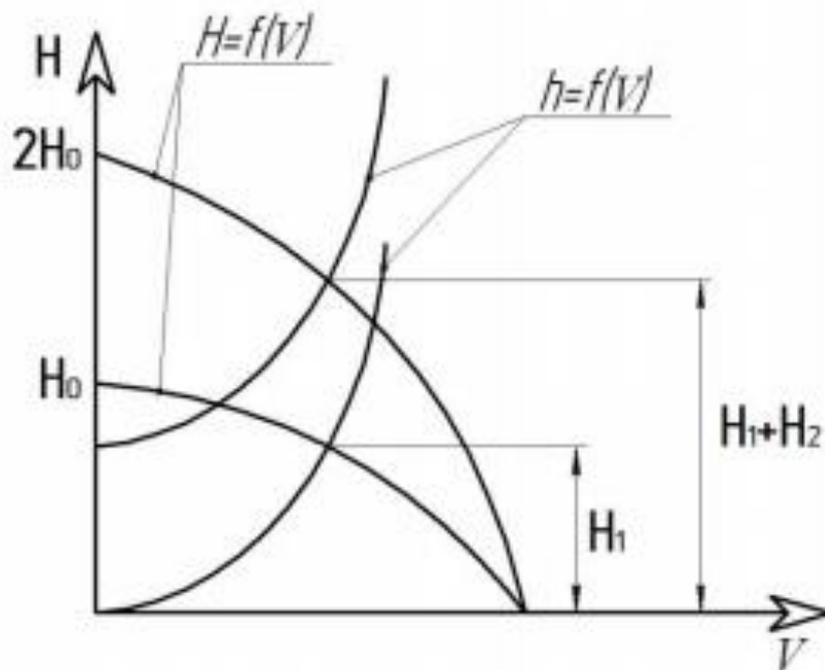


Рисунок 8.1 Последовательное подключение насосов

Параллельное соединение насосов применяют для увеличения расхода. При этом напор насосов одинаков, т.к. одинаково давление в точках объединения магистралей, в точке,  $H_0$  (рисунок 8.2). Общий расход двух параллельно соединенных насосов равен сумме расходов обоих насосов при одном и том же напоре. Суммарная характеристика параллельно соединенных насосов получается в результате сложения абсцисс характеристик, насосов, взятых при одной и той же ординате.

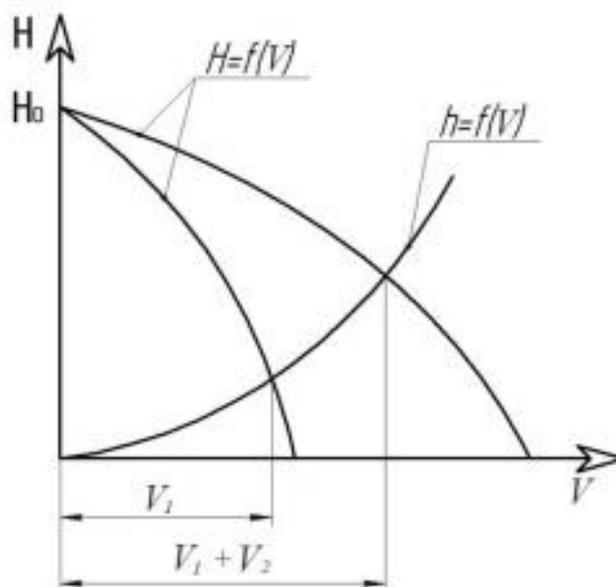


Рисунок 8.2 Параллельное подключение насосов

Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рисунке 8.3.

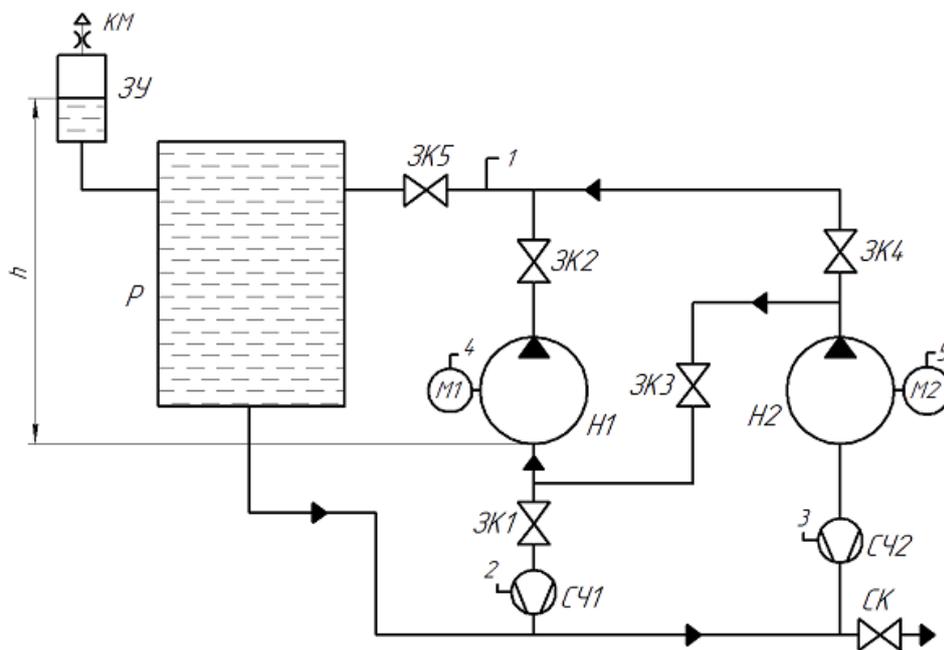


Рисунок 8.3 Схема лабораторного стенда:

Р – резервуар для жидкости; ЗУ – заливочное устройство с краном Маевского (КМ); СЧ – счетчик расхода жидкости с импульсным выходом;  
 Н1 – циркуляционный насос №1; Н2 – циркуляционный насос №2;  
 ЗК – запорные краны; СК – сливной кран; 1 – датчик давления жидкости (кПа); 2 – расход жидкости через насос Н1 ( $V_1$ , л/мин); 3 – расход жидкости через насос Н2 ( $V_2$ , л/мин); 4 – мощность насоса №1 (Вт); 5 – мощность насоса №2 (Вт)

**Проверить! аварийная кнопка «Стоп» должна находиться в отжатом положении. Для этого повернуть её по часовой стрелке (направление стрелками указано на кнопке).**

#### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой лабораторной установки (рисунок 8.3) и расположением приборов. Составить описание и заготовить таблицы 8.1, 8.2 и 8.3 для регистрации результатов испытаний.

2. Подготовить установку к испытаниям. Удостовериться, что сливной кран (СК) закрыт и уровень воды наблюдается в заливочном устройстве (ЗУ), в противном случае долить жидкость в систему. Подтеки не допускаются.

3. Подключить стенд к сети 220 В.

4. Включить питание стенда кнопкой «Сеть».

5. Подключить автоматизированный стенд к USB разъему компьютера и запустить программу Пуск → Программы → MeasLAB → «Испытание насосов».

6. Открыть кран подачи воды ЗК4, остальные закрыть.

7. Включить насос Н2, кнопкой ВК2.

8. Определить давление, развиваемое при нулевой подаче.

9. При включенном насосе Н2, медленно приоткрывая кран ЗК5 и регулируя расход воды, снять показания при 5-ти различных значениях.

10. Результаты измерений занести в таблицу 8.1.

11. При включенном насосе Н2, медленно закрыть кран ЗК5.

12. Выключить насос Н2, кнопкой ВК2.

13. Закрыть кран подачи воды ЗК4, проверить чтобы все краны были закрыты.

14. Провести испытания параллельно работающих насосов. Для этого:

– Открыть краны подачи воды ЗК1, ЗК2, ЗК4. Краны ЗК3 и ЗК5 должны быть закрыты.

– Включить насосы Н1 и Н2, кнопками ВК1 и ВК2, соответственно.

– Определить давление, развиваемое при нулевой подаче.

– При включенных насосах, регулируя краном ЗК5 установить 5-ть различных значений расходов.

15. Результаты измерений занести в таблицу 8.2.

16. Выключить оборудование установки по алгоритму обратному включению.

17. Используя данные напорно-расходной характеристики насоса Н1 (лабораторная работа №7) и насоса Н2 определить расчетную суммарную напорно-расходную характеристику 2-х параллельно работающих насосов.

18. По экспериментальным данным построить на одном графике зависимости (см. рисунок 8.2):

- напорно-расходную характеристику насоса Н1;
- напорно-расходную характеристику насоса Н2;
- напорно-расходную характеристику двух параллельно работающих насосов.

19. Провести испытания последовательно работающих насосов. Для этого:

- Открыть кран подачи воды ЗК2 и ЗК3. Краны ЗК1, ЗК4 и ЗК5 должны быть закрыты.

- Включить насосы Н1 и Н2, кнопками ВК1 и ВК2, соответственно.

- Определить давление, развиваемое при нулевой подаче.

- При включенных насосах, регулируя краном ЗК5 установить 5-ть различных значений расхода воды.

20. Результаты измерений занести в таблицу 8.3.

21. Используя данные напорно-расходной характеристики насоса Н1 (лабораторная работа №7) и насоса Н2 определить расчетную суммарную напорно-расходную характеристику 2-х последовательно работающих насосов.

22. По экспериментальным данным построить на одном графике зависимости:

- напорно-расходную характеристику насоса Н1;

- напорно-расходную характеристику насоса Н2;
- напорно-расходную характеристику двух последовательно работающих насосов.

#### Обработка данных

Определить давление, создаваемое насосом в магистрали ( $\Delta p$ ) с учетом поправки на уровень воды в резервуаре (Па)

$$\Delta p = p_M - p_{вх} \quad (8.1)$$

где  $p_M$  – давление жидкости в нагнетательном трубопроводе, Па;

$p_{вх}$  – давление на входе в насос, создаваемое столбом жидкости в резервуаре, (Па)

$$p_{вх} = h \cdot \rho \cdot g \quad (8.2)$$

где  $h$  – разность уровней воды в резервуаре и на входе в насос, м;

$\rho$  – плотность воды, 998 кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, 9,81 м/с<sup>2</sup>.

Напор насоса, м

$$H = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} \quad (8.3)$$

Общий расход жидкости, л/мин

$$V = V_1 + V_2 \quad (8.4)$$

Определить полезную мощность, Вт

$$N_{п} = V \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad (8.5)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости при средней температуре, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$V$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с.

Вычислить мощность на валу насоса по формуле, Вт

$$N = N_{дв} \eta_{дв} \quad (8.6)$$

где  $N_{дв}$  – потребляемая мощность электродвигателем насоса, Вт;

$\eta_{дв}$  – КПД элетродвигателя насоса, в среднем принимается  $\eta_{дв} = 0,85$ .

Рассчитать коэффициент полезного действия насоса

$$\eta = \frac{N_{п}}{N} \cdot 100 \quad (8.7)$$

Результаты расчетов занести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 – Рабочий журнал по определению характеристик насоса Н2

№ п/п	$p_m$ , кПа	$\Delta p$ , Па	H, м	$V_1$ , л/мин	$N_{дв}$ , Вт	$N_p$ , Вт	N, Вт	$\eta$ , %

Таблица 8.2 – Рабочий журнал по определению экспериментальной суммарной характеристики двух параллельно работающих насосов

№ п/п	$p_m$ , Па	$\Delta p$ , Па	H, м	$V_1$ , л/мин	$V_2$ , л/мин	V, л/мин

Таблица 8.3 – Рабочий журнал по определению экспериментальной суммарной характеристики двух последовательно работающих насосов

№ п/п	$p_m$ , Па	$\Delta p$ , Па	H, м	$V = V_2$ , л/мин

### Контрольные вопросы

1. Для каких целей применяются последовательное и параллельное соединения насосов?

2. Как определяется суммарная характеристика 2-х последовательно работающих насосов?

3. Как определяется суммарная характеристика 2-х параллельно работающих насосов?

### **Лабораторная работа № 9**

#### **«Изучение устройства и принципа работы поршневого воздушного компрессора»**

*Цель работы:* закрепление теоретических знаний по конструкции, испытаниям и расчету поршневого воздушного компрессора.

*Задачи работы:*

1. Изучить основные узлы поршневого компрессора и принцип его работы.

2. Рассчитать мощность электродвигателя компрессора.

3. Снять параметры рабочего режима и сравнить действительную электрическую мощность, потребляемую компрессором с расчетной.

#### **Общие сведения**

По принципу действия компрессоры делятся на два класса:

– объемного действия (поршневые, винтовые, ротационные, спиральные). Рабочие органы машин этого класса всасывают определенный объем рабочего вещества, сжимают его благодаря замкнутому объему и затем нагнетают в камеру нагнетания. Эти машины дискретного принципа действия, рабочие процессы в которых совершаются строго последовательно, повторяясь циклически;

– динамического действия (центробежные, осевые), в которых рабочее вещество непрерывно перемещается через проточную часть компрессора, при этом кинетическая энергия потока преобразуется в потенциальную.

Поршневые компрессоры делятся по расположению цилиндров на горизонтальные, вертикальные, угловые, радиальные. По способу прохождения пара через цилиндры – на прямоточные с движением пара в одном направлении в течении всего процесса и не прямоточные

соответственно. По количеству цилиндров на одно- и многоцилиндровые (до 12 цилиндров), а по количеству ступеней сжатия на одно- и многоступенчатые.

Рассмотрим принцип работы компрессора, рисунок 9.1. На схеме «а» поршень движется вниз, давление внутри цилиндра понижается и становится меньше, чем во всасывающей трубке. Всасывающий клапан 3 открывается, и по мере опускания поршня 5 воздух заполняет цилиндр. После того как поршень пройдет нижнюю мертвую точку (схема «б»), он начинает двигаться в обратном направлении, сжимая воздух в цилиндре, всасывающий клапан закрывается.

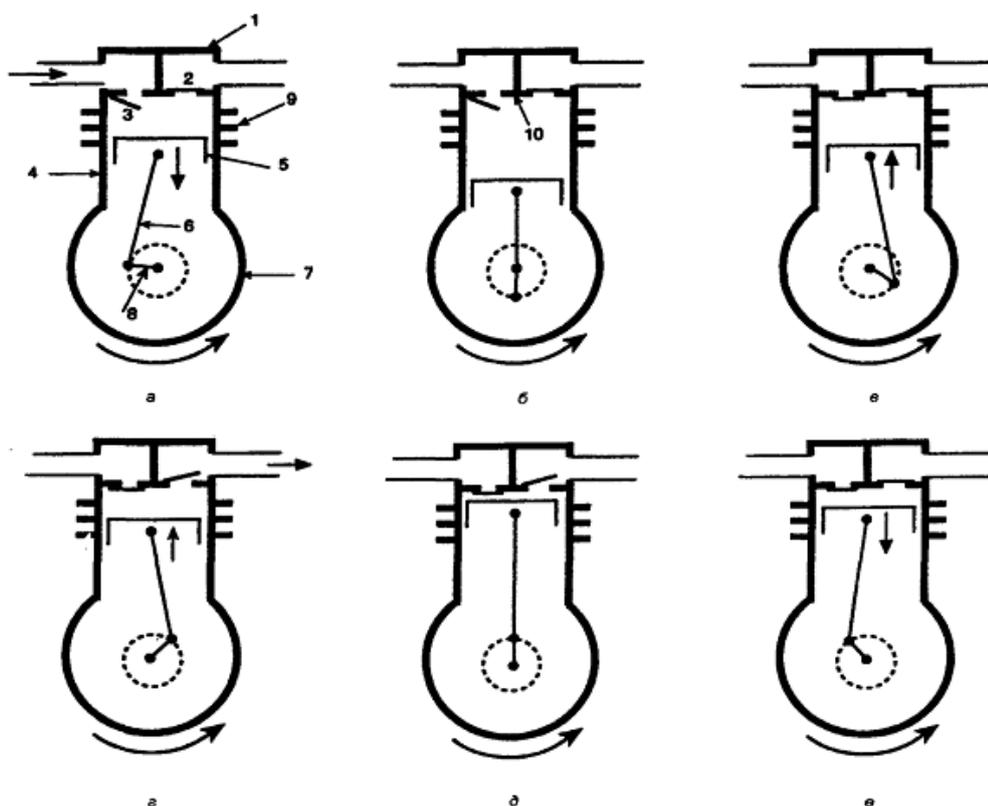


Рисунок 9.1 Принцип работы поршневого компрессора:

- 1 – головка блока; 2 – нагнетательный клапан; 3 – всасывающий клапан;  
 4 – блок цилиндров; 5 – поршень; 6 – шатун; 7 – картер; 8 – кривошип;  
 9 – охлаждающие ребра; 10 – клапанная плита

В это время нагнетательный клапан 2 остается закрытым, так как давление в цилиндре пока ниже давления в нагнетательном трубопроводе и

еще недостаточно для того, чтобы преодолеть сопротивление нагнетательного клапана (схема «в»). На схеме «г» давление в цилиндре не только достигает значения, равного давлению в нагнетательном трубопроводе, но и превосходит его настолько, чтобы преодолеть сопротивление нагнетательного клапана и открыть его. Сжатый воздух выталкивается из цилиндра до тех пор, пока поршень не дойдет до верхней мертвой точки (схема «д»). По конструктивным соображениям, чтобы при разогреве деталей компрессора во время работы, поршень, находясь в верхней мертвой точке, не соприкасался с клапанной плитой 10, необходимо обеспечить зазор (обычно менее 1 мм). Геометрическое пространство, соответствующее этому зазору, называют мертвым объемом, в котором остается какой-то объем, занятый воздухом. Как только поршень начинает двигаться в обратном направлении, т. е. опускаться, воздух, заключенный в мертвом объеме, начинает расширяться и давление в цилиндре падает ниже давления в нагнетательном трубопроводе. Нагнетательный клапан 2 закрывается (схема «е»). В момент, когда давление в цилиндре становится ниже давления во всасывающем трубопроводе, открывается всасывающий клапан 3 (схема «а»), обеспечивая, таким образом, новый цикл.

#### Описание лабораторного стенда

Воздушный компрессор состоит из электродвигателя М, который приводит в движение поршень посредством коленчатого вала, шатуна и поршневого пальца, рисунок 9.2. Сжатый воздух нагнетается в атмосферу. Датчик давления 4 снимает показания давления в цилиндре компрессора. Оптический инкрементный энкодер 1 измеряет положение поршня и соответственно число оборотов коленчатого вала. С помощью ЛАТРа (регулируемого лабораторного автотрансформатора) можно задавать требуемую скорость вращения электродвигателя.

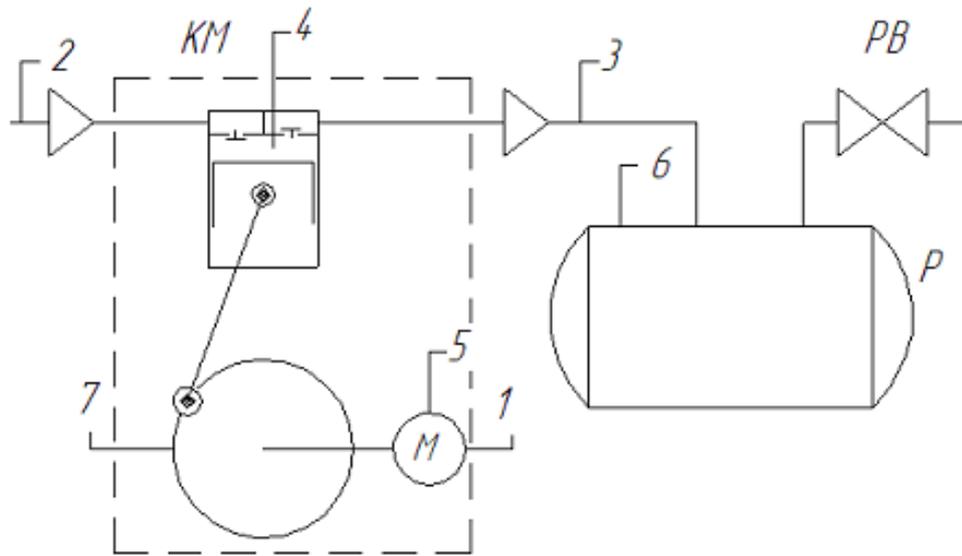


Рисунок 9.2 Принципиальная схема лабораторной установки:  
 КМ – воздушный компрессор; P – ресивер; PB – регулятор расхода; М –  
 электродвигатель

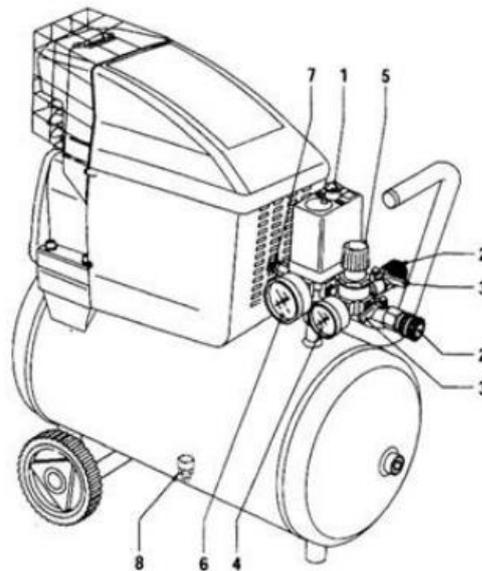


Рисунок 9.3 Основные элементы поршневого воздушного компрессора:  
 1 – выключатель («ON/OFF»), 2 – патрубок соединения с воздушным  
 шлангом, 3 – кран подачи сжатого воздуха, 4 – манометр редуктора давления,  
 5 – ручка редуктора, 6 – манометр давления в ресивере,  
 7 – предохранительный клапан, 8 – кран слива конденсата из ресивера

## Порядок выполнения работы

1. Изучить методические указания, заготовить таблицу 9.1 для записи результатов измерений и вычислений.
2. Включить лабораторную установку с помощью автоматического выключателя 220В.
3. Включить компьютер, подсоединить USB шнур установки к компьютеру и запустить программу лабораторной работы «Компрессор».
4. Клавишей ВК1 включить компрессор.
5. С помощью ЛАТРа установить рабочее напряжение 75В, РВ при этом должен быть полностью открытым.
6. Постепенно закрывая регулятор РВ выставить давление в ресивере 50 кПа и при установившемся режиме работы воздушного компрессора замерить параметры и занести в таблицу 9.1.
7. Изменить рабочее напряжение и повторить опыты. Результаты занести в таблицу 9.1.
8. По окончании опытов с помощью ЛАТРа снизить рабочее напряжение, выключить компрессор.

### Обработка результатов

Объем, описываемый поршнями компрессора – это объем, который освобождается в цилиндре при перемещении поршня от НМТ (нижней мертвой точки) до ВМТ (верхней мертвой точки), м<sup>3</sup>/с:

$$V_h = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S \cdot Z \cdot n \quad (9.1)$$

где D – диаметр цилиндра, 50 мм;

S – ход поршня, 23 мм;

Z – число цилиндров, 1;

n – частота вращения вала электродвигателя, с<sup>-1</sup>.

Действительная производительность компрессора, м<sup>3</sup>/с:

$$V_d = \lambda \cdot V_h \quad (9.2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент подачи компрессора учитывает потери при сжатии и равен:

$$\lambda = \lambda_c \cdot \lambda_{др} \cdot \lambda_w \cdot \lambda_{пл} \quad (9.3)$$

где  $\lambda_c$  – объемный коэффициент, обусловленный наличием мертвого пространства;

$\lambda_{др}$ ,  $\lambda_w$ ,  $\lambda_{пл}$  – коэффициенты дросселирования, подогрева и плотности.

Объемный коэффициент  $\lambda_c$  можно определить по формуле:

$$\lambda_c = 1 - c \cdot \left[ \left( \frac{P_{ц}}{P_o} \right)^{1/m} - 1 \right] \quad (9.4)$$

где  $c$  – относительное мертвое пространство,  $0,05 \div 0,07$ ;

$P_o$  – начальное давление, окружающего воздуха (атмосферное давление), кПа;

$P_{ц}$  – давление (в цилиндре компрессора), кПа.

Показатель политропы можно определить по формуле:

$$m = \frac{1}{\frac{\ln \frac{T_k}{T_o}}{1 + \frac{P_{ц}}{P_o} \ln \frac{P_{ц}}{P_o}}} \quad (9.5)$$

где  $T_o$  – начальная температура, окружающего воздуха, К;

$T_k$  – конечная температура воздуха, на выходе из компрессора, К.

Коэффициент дросселирования:

$$\lambda_{др} = 1 - \frac{(1+c)}{\lambda_c} \cdot \left( 1 - \frac{P_{вс}}{P_o} \right) \quad (9.6)$$

где  $P_{вс} = P_o - \Delta P_o$  – давление всасывания,

$\Delta P_o = (0,01 \div 0,05) P_o$  – гидравлическое сопротивление во всасывающем клапане.

Коэффициент подогрева:

$$\lambda_w = \frac{T_o}{T_k} = \frac{t_o + 273}{t_k + 273} \quad (9.7)$$

Коэффициенты плотности  $\lambda_{пл}$  расчетным способом получить невозможно поэтому используют график (рисунок 9.4), в зависимости от степени сжатия  $\pi = P_{ц} / P_o$ .

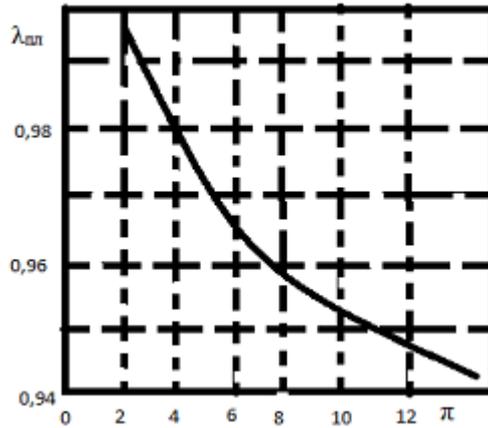


Рисунок 9.4 Зависимость  $\lambda_{пл} = f(\pi)$

Мощность, затраченную на сжатие пара в действительном процессе, называют индикаторной, кВт:

$$N_i = P_i \cdot V_h \quad (9.8)$$

где  $P_i$  – среднее давление в цилиндре, кПа.

Под эффективной мощностью понимают мощность на валу компрессора, которая равна сумме мощностей индикаторной и трения, кВт:

$$N_e = N_i + N_{тр} \quad (9.9)$$

где  $N_{тр}$  – мощность, затрачиваемая на трение (мощность холостого хода), кВт.

Для определения  $N_{тр}$  пользуются выражением:

$$N_{тр} = P_{тр} \cdot V_h \quad (9.10)$$

где  $P_{тр}$  – величина удельного давления трения, которая зависит от производительности компрессора, т. е. от основных его размеров и быстроходности, принимается величиной постоянной и равной 60 кПа.

Мощность электродвигателя рекомендуется выбирать с запасом 10÷12 % во избежание его перегрузки, тогда:

$$N_{эл} = (1,1 \div 1,12) \cdot N_e / (\eta_{эл} \cdot \eta_{п}) \quad (9.11)$$

где  $\eta_{эл}$  – КПД электродвигателя, 0,8 – 0,85;

$\eta_{п}$  – КПД ременной передачи, 0,96 – 0,98.

Таблица 9.1 – Протокол результатов измерений и вычислений

Измеряемые параметры							Вычисляемые параметры						
U, В	$t_o,$ °C	$t_k,$ °C	$P_c,$ кПа	$P_p,$ кПа	n, об/мин	$N_{эл},$ Вт	$N_i,$ Вт	$N_{тр},$ Вт	$N_e,$ Вт	$N_{эл},$ Вт	$\lambda$	$V_h,$ м <sup>3</sup> /с	$V_d,$ м <sup>3</sup> /с
75													
80													
85													

### Контрольные вопросы

1. Назовите основные узлы воздушного компрессора и принцип его работы
2. Опишите принцип работы/режим компрессора
3. Назовите основные типы поршневых компрессоров

# ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

## Лабораторная работа № 10

### **«Исследование работы теплообменных аппаратов при теплообмене между системами пар-жидкость и жидкость-газ»**

*Цель работы:* испытание рекуперативного теплообменного аппарата при стационарном режиме теплообмена и получение основных характеристик его работы.

*Задачи работы:*

1. Закрепить знания по теории теплообмена, способах переноса теплоты.
2. Изучить работу теплообменного оборудования при различных схемах движения теплоносителей.

#### Общие сведения

Теплообмен – необратимый самопроизвольный перенос тепла от более нагретых тел к менее нагретым. Движущей силой этого процесса является разность температур тел. Перенос теплоты осуществляется тремя различными по физике способами: теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.

Теплопроводность – представляет собой молекулярный перенос теплоты в телах, обусловленный неоднородностью температурного поля.

Под конвекцией понимают процессы переноса теплоты при перемещении макроскопических объемов газа или жидкости в пространстве между областями с различной температурой. При этом перенос тепла неразрывно связан с переносом самой среды. Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью, и этот совместный процесс называют конвективным теплообменом.

Конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела и жидкостью или газом называется теплоотдачей.

Процессы теплопроводности и конвективного теплообмена могут сопровождаться излучением. Тепловое излучение – процесс переноса теплоты с помощью электромагнитных волн различной длины.

На практике процессы переноса тепла от одной среды к другой осуществляются в теплообменных аппаратах. По принципу действия они могут быть разделены на рекуперативные и смесительные.

В смесительных теплообменниках тепло передается при непосредственном смешивании теплоносителей.

В рекуперативных теплообменниках перенос тепла осуществляется через поверхность теплообмена – глухую стенку, исключая смешение теплоносителей. Процесс передачи тепла между различными средами через разделительную твердую стенку называют теплопередачей.

Общий поток тепла  $Q$ , передаваемого в теплообменном аппарате (теплообменнике), для конкретного технологического процесса определяется с помощью теплового баланса, составляемого при расчете этого процесса по заданной производительности:

$$Q = Q_T = Q_X + Q_{nom} \quad (10.1)$$

где  $Q_T$  – тепло, отдаваемое горячим теплоносителем;

$Q_X$  – тепло, воспринимаемое холодным теплоносителем;

$Q_{nom}$  – потери тепла в окружающую среду.

Тепло, отдаваемое горячим теплоносителем равно:

$$Q_T = G_T c_T (t_n^T - t_k^T) \quad (10.2)$$

если теплоноситель при теплообмене не изменяет агрегатного состояния, или:

$$Q_T = G_T (H_T - H_K) = G_T r \quad (10.3)$$

если изменяет (например, при использовании в качестве теплоносителя насыщенного водяного пара).

Тепло, воспринимаемое холодным теплоносителем равно:

$$Q = G_x c_x (t_k^x - t_n^x) \quad (10.4)$$

В этих зависимостях:

$G_T, G_x$  – массовый расход горячего и холодного теплоносителей, соответственно, кг/с;

$c_T, c_x$  – теплоемкость горячего и холодного теплоносителя, соответственно, Дж/(кг·К);

$t_n^T, t_n^x, t_k^T, t_k^x$ , – температура горячего и холодного теплоносителей, соответственно до и после теплообмена;

$H_T, H_K$  – энтальпия (теплосодержание), соответственно парового теплоносителя и его конденсата, Дж/кг;

$r = H_T - H_K$  – удельная теплота парообразования (конденсации) теплоносителя, Дж/кг.

$H_T, H_K, r$  определяются по таблице свойств насыщенных паров теплоносителя в зависимости от температуры и давления. Определенный по тепловому балансу (8.1) общий тепловой поток  $Q$  передается через поверхность теплообмена теплообменника технологической схемы процесса.

Необходимая поверхность теплообмена теплообменника определяется из уравнения теплопередачи для установившегося состояния процесса:

$$Q = k\Delta t_{cp}F \quad (10.5)$$

выражающего зависимость между потоком тепла  $Q$  [Вт] горячего теплоносителя к холодному в единицу времени, коэффициентом теплопередачи  $K$  [Вт/(м<sup>2</sup>·К)], поверхностью теплообмена  $F$  [м<sup>2</sup>] и средней разностью температур горячего и холодного теплоносителя  $\Delta t_{cp}$  [К].

Коэффициент скорости теплового процесса – коэффициент теплопередачи  $K$  показывает, какое количество тепла переходит в единицу времени от горячего к холодному теплоносителю через поверхность теплообмена  $F=1\text{ м}^2$  при средней разности температур  $\Delta t_{cp} = 1$  градус.

Средняя движущая сила  $\Delta t_{cp}$  определяется с учетом принятой схемы организации движения потоков теплоносителей в теплообменнике.

Зная,  $K$  и  $\Delta t_{cp}$  из уравнения (10.5) можно определить площадь поверхности теплообмена аппарата  $F$ , необходимую для осуществления процесса теплопередачи заданной тепловой нагрузки  $Q$ :

$$F = \frac{Q}{k\Delta t_{cp}} \quad (10.6)$$

От величины  $F$  зависят и общие габариты теплообменного аппарата, определяемые конструктивным расчетом.

### Описание лабораторной установки

Схема установки представлена на рисунке 10.1.

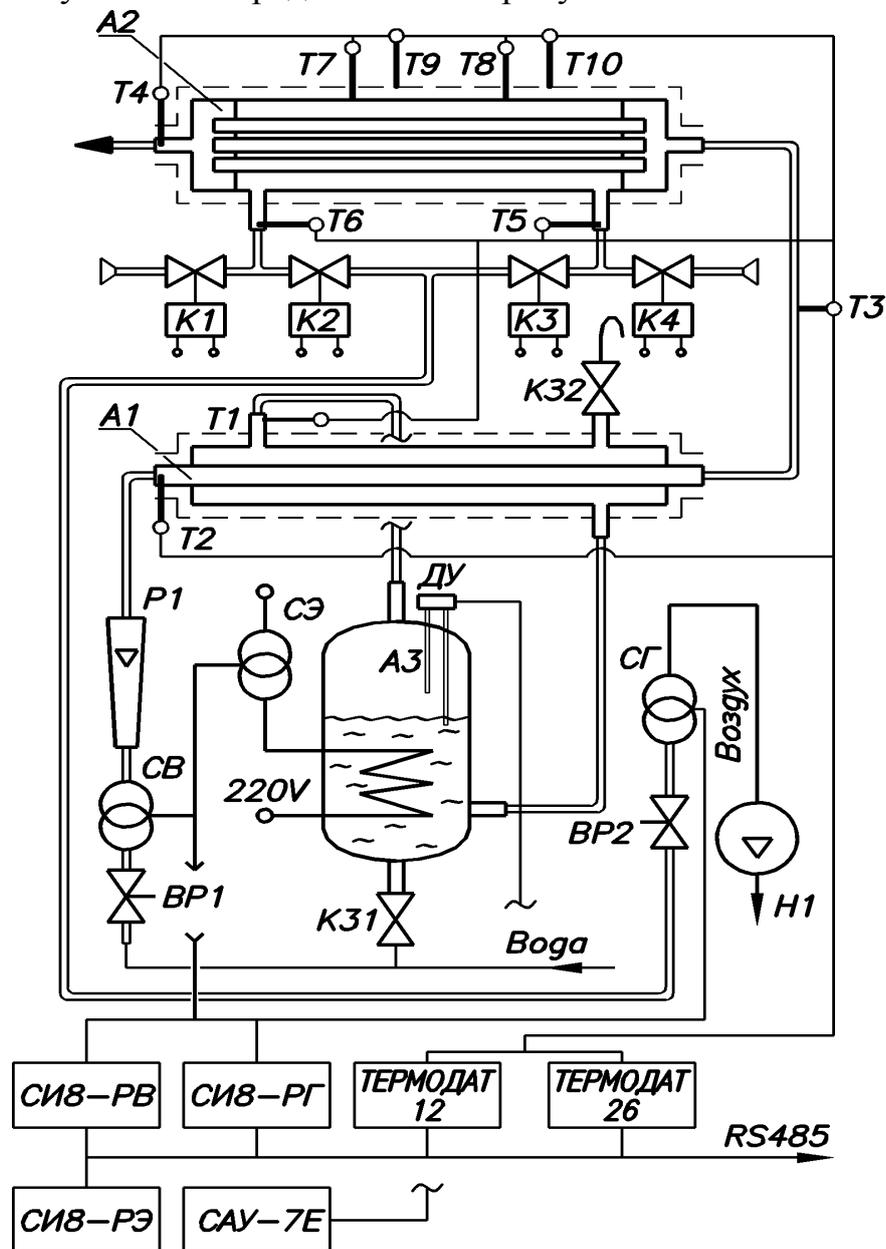


Рисунок 10.1 Схема экспериментальной установки

Установка состоит из двух теплообменников А1, А2 и парогенератора А3 – основные ее рабочие элементы. Теплообменник А1 типа «труба в трубе» предназначен для теплообмена между системами пар - жидкость. Его внутренняя медная труба имеет наружный диаметр  $d_n = 8$  мм, внутренний диаметр  $d_v = 6,8$  мм, толщина стенки  $\delta = 0,6$  мм. Длина внутренней трубы, по которой рассчитывается поверхность теплообмена,  $L_1 = 1220$  мм (что соответствует площади теплообмена  $F_1 = 0,023$  м<sup>2</sup>). Наружная труба из нержавеющей стали диаметром 34×2 мм. Теплообменник А1 покрыт слоем теплоизоляции толщиной 13 мм

Теплообменник А2 кожухотрубный одноходовой предназначен для теплообмена между системами жидкость - газ. Состоит из внутренних трубок, изготовленных из нержавеющей стали в количестве  $n = 37$ , с наружным диаметром  $d_n = 15$  мм., внутренним диаметром  $d_{вн} = 14$  мм. и толщиной стенки  $\delta = 0,5$  мм. Внутренний диаметр корпуса теплообменника  $D_{вн} = 150$  мм. Длина трубок теплообменника, по которой рассчитывается площадь теплообмена,  $L_2 = 1550$  мм., (что соответствует площади теплообмена  $F_2 = 2,5$  м<sup>2</sup>). Теплообменник не содержит по конструкции внутренних поперечных перегородок в межтрубном пространстве и покрыт слоем теплоизоляции толщиной 20 мм. Общая поверхность теплоизоляции составляет  $F_{из}^{A2} = 0,975$  м<sup>2</sup>.

Установка снабжена локальным парогенератором А3 объемом 12 л и мощностью 6 кВт. Наружная поверхность парогенератора линии подвода пара и отвода конденсата также теплоизолированы. Суммарная наружная поверхность теплоизоляции парогенератора и его линий составляет  $F_{из} = 1,16$  м<sup>2</sup>, теплообменника А1 –  $F_{из}^{A1} = 0,244$  м<sup>2</sup>, что составляет 20 % от общей поверхности теплоизоляции тракта парогенератор А3 – теплообменник А1.

Расход холодной воды из водопроводной сети измеряется двумя приборами: ультразвуковым счетчиком с импульсным выходом и ротаметром Р1. Ультразвуковой счетчик совместно со счетчиком импульсов СИ8(РВ)

обеспечивает цифровой замер расхода воды. Ротаметр  $P_1$  позволяет визуально контролировать текущий расход воды и корректировать его вентилем ВР1.

Холодная вода поступает на вход теплообменника А1 во внутреннюю трубу, где она обменивается теплом с насыщенным водяным паром, поступающим из парогенератора А3 в кольцевое пространство между внутренней и наружной трубами теплообменника А1. Конденсат пара стекает обратно по отводящей линии в парогенератор А3.

Теплообменник А1 снабжен продувочным краном К32 для удаления из него воздуха при пуске установки.

Нагретая вода из теплообменника А1 поступает в трубное пространство теплообменника А2, где она нагревает поток воздуха, подаваемого в межтрубное пространство теплообменника А2 под действием разрежения, создаваемого вентилятором Н1.

Поток воздуха с помощью электромагнитных клапанов может переключаться в прямоточном или противоточном направлении движения относительно потока воды.

Измерители постоянно отображают входные и выходные данные температуры сред теплообменников, по точкам контроля температур в следующей последовательности:

- 1 – греющий пар А1;
- 2 – вода на входе А1;
- 3 – вода на выходе А1 и входе А2;
- 4 – вода на выходе А2;
- 5 – при прямотоке: воздух на входе А2; при противотоке: воздух на выходе А2;
- 6 – при прямотоке: воздух на выходе А2; при противотоке: воздух на входе А2;
- 7, 8 – внешняя поверхность А2;
- 9, 10 – внешняя поверхность изоляции А2.

## Пуск установки

Включение установки и вывод её на назначенный режим осуществляется в присутствии инженера или преподавателя в следующей последовательности:

1. Включить установку переключателем «Включение установки» (поставить в положение «Вкл»).

2. Наблюдать свечение светодиодных индикаторов на приборах щита КиП и управления.

3. По светодиодным индикаторам уровня воды в парогенераторе прибора САУ-М7Е проконтролировать наличие воды и ее уровень. Свечение индикаторов нижнего и среднего уровней – работоспособное состояние парогенератора (допускается работа и со свечением индикатора нижнего уровня).

Залив и доливание воды в парогенератор осуществляется с помощью крана на задней стороне установки из водопроводной сети.

**ВНИМАНИЕ. Не допускать перелива уровня воды в парогенераторе (свечение индикатора верхнего уровня) при заливе и доливе – неработоспособное состояние парогенератора.**

4. Открыть продувочный кран К32 на теплообменнике А1.

5. Установить задание по температуре пара на измерителе-регуляторе в соответствии с инструкцией на прибор (рекомендуемая температура пара 103 °С).

6. Включить парогенератор нажатием клавиши «Пуск» (при этом наблюдается свечение индикатора включения).

7. Наблюдать за ростом температуры воды парогенератора вплоть до ее закипания.

8. Наблюдать за появлением парового потока из продувочного крана К32 теплообменника А1. Через 10-15 сек продувки парового пространства закрыть кран-воздушник.

9. Вентилем регулирования потока воды ВР1 установить необходимый расход по показаниям ротаметра (рекомендуется 40-50 литров/час). Истинный расход воды определяется по цифровому прибору.

#### Остановка установки

Включение установки осуществляется в присутствии инженера или преподавателя в следующей последовательности:

1. Кнопкой «Стоп» (красная) выключить электропитание на парогенераторе.
2. Переключатель направления потоков воздуха поставить в нейтральное (среднее) положение.
3. Подождать 3 – 4 мин, время за которое пройдет частичная конденсация пара в паровом пространстве теплообменника А1, открыть продувочный кран К32.
4. Закрывать вентиль регулирования расхода воды.
5. Выключить установку переключателем «Включение установки» (поставить в положение «Выкл»).

#### Порядок проведения работы

После вывода установки на режим и установления расхода воды вентилем ВР1 по прибору (рекомендуемый расход 50 л/час) необходимо:

1. Переключателем направления потока воздуха («противоток – выкл. – проток») установить в положение «противоток».
2. Регулятором расхода воздуха установить поток воздуха в межтрубном пространстве теплообменника А2 по перепаду давления на измерительной диафрагме (рекомендуется  $\Delta p \approx 1000$  Па) с помощью вентиля ВР2.
3. При выходе установки на стационарный режим теплообмена (через 15 мин) приступить к снятию показаний прибора, замеряющего входные и выходные параметры теплообменников А1, А2 и записать их в таблицы по формам 10.1 и 10.2.

4. Записать показания приборов, замеряющих потребляемую мощность парогенератором, расход воды и воздуха.

5. Для увеличения точности эксперимента через 1 – 2 мин снимают повторные показания параметров с последующим их усреднением.

6. Переключателем направления потока воздуха в межтрубном пространстве теплообменника А2 поменять направление движения на противоположное (прямоток).

7. По выходу процесса теплообмена на стационарный режим (через 15 мин) записать все параметры процесса в таблицы под выбранной схемой движения потоков.

8. Для увеличения точности эксперимента через 1 – 2 мин снимают повторные показания параметров с последующим их усреднением.

9. Выполнить остановку установки в соответствии с указанной последовательностью.

10. Обработать экспериментальные данные в соответствии с методическими указаниями.

Таблица 10.1 – Теплообменник А1

Схема включения	Мощность, потребляемая парогенератором N, Вт	Объемный расход воды, л/час	Массовый расход воды G <sub>в</sub> , кг/с	Температура, °С		
				конденсации и пара	воды	
					вход/выход t <sub>1</sub>	вход t <sub>2</sub>
						

Таблица 10.2 – Теплообменник А2

Схема включения	Перепад давления на диафрагме, Па	Объемный расход воздуха $Q_{\text{возд}}$ , м <sup>3</sup> /ч	Температура, °С				Поверхность теплообменника а		Поверхность теплоизоляции и	
			воды		воздуха		t <sub>7</sub>	t <sub>8</sub>	t <sub>9</sub>	t <sub>10</sub>
			ВХОД t <sub>3</sub>	ВЫХОД t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>				

### Обработка результатов измерений

1. Вычислить количество теплоты  $Q_B^{A1}$ , (Дж/с), полученное водой в теплообменнике А1:

$$Q_B^{A1} = G_B c_B (t_3 - t_2) \quad (10.7)$$

где  $c_B = 4186$  Дж/(кг·К) – теплоемкость воды;

$G_B$  – массовый расход воды,  $G_B = \frac{Q_B}{3600}$ , кг/с.

2. Используя измеренную мощность, потребляемую парогенератором из электрической сети, определить общие потери тепла в окружающую среду  $Q_{\text{потерь}}$  (Дж/с) через поверхность теплоизоляции контура парогенератор – теплообменник А1:

$$Q_{\text{потерь}}^{\text{общ}} = N - Q_B \quad (10.8)$$

3. Считая, что потери тепла через теплоизоляцию теплообменника А1  $Q_{\text{потерь}}^{A1}$  составляют 20 % (по площади теплоизоляции) от общих потерь тепла, определяют:

$$Q_{\text{потерь}}^{A1} = 0,2 \cdot Q_{\text{потерь}}^{\text{общ}} \quad (10.9)$$

4. Используя характер изменения температур теплоносителей в случае конденсации горячего теплоносителя, определить среднюю разность температур  $\Delta t^{cp}$  (°С):

$$\Delta t_{cp}^{A1} = \frac{(t_1 - t_2) - (t_1 - t_3)}{\ln \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_3}} \quad (10.10)$$

5. Вычислить значение коэффициента теплопередачи  $K_1$  [Вт/(м<sup>2</sup>·К)] для теплообменника А1:

$$K_1 = \frac{Q_e^{A1}}{F_1 \Delta t_{cp}^{A1}} \quad (10.11)$$

где  $F_1$  – площадь поверхности теплообмена.

6. Для теплообменника А2 вычислить:

а) количество тепла  $Q_e^{A2}$  (Дж/с), переданное водой:

$$Q_e^{A2} = G_e c_e (t_3 - t_4) \quad (10.12)$$

б) количество тепла  $Q_{возд}$  (Дж/с), полученное воздухом при противотоке:

$$Q_{возд}^{прот} = G_{возд} c_{возд} (t_5 - t_6) \quad (10.13)$$

и прямотоке:

$$Q_{возд}^{прям} = G_{возд} c_{возд} (t_6 - t_5) \quad (10.14)$$

где  $c_{возд} = 1005$  Дж/(кг·К) – теплоемкость воздуха;

$G_{возд}$  – массовый расход воздуха, кг/с

$Q_{возд} = 2,8 \cdot \sqrt{\Delta p_g}$ , м<sup>3</sup>/ч ( $\Delta p_g$  – перепад давления на измерительной диафрагме).

7. С учетом схем движения теплоносителей (противоток - прямоток) построить температурные схемы, посчитать значения больших и меньших разностей температур между теплоносителями и вычислить значения средних разностей температур  $\Delta t_{cp}^{прот}$  и  $\Delta t_{cp}^{прям}$ , в зависимости от отношения

$$\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}}$$

8. Вычислить значения коэффициентов теплопередачи  $K_2$  [Вт/(м<sup>2</sup>·К)] для теплообменника А2:

а) противоток

$$K_2^{прот} = \frac{Q_6^{A2}}{F_2 \Delta t_{cp}^{прот}} \quad (10.15)$$

б) прямоток

$$K_2^{прям} = \frac{Q_6^{A2}}{F_2 \Delta t_{cp}^{прям}} \quad (10.16)$$

где  $F_2$  – площадь поверхности теплообмена.

9. Оценить соотношения величин термических сопротивлений при теплопередаче между системами пар-жидкость, жидкость-газ через

отношение коэффициентов  $\frac{K_1}{K_2}$ .

10. Для одной из выбранных схем движения теплоносителей определить потери тепла в окружающую среду через поверхность теплоизоляции теплообменника  $A2$   $Q_{потерь}^{A2}$ , Дж/с:

$$Q_{потерь}^{A2} = Q_6^{A2} - Q_{возд} \quad (10.17)$$

11. Для выбранной схемы движения теплоносителей определить среднюю температуру поверхности теплообменника  $A2$   $t_{cp}^{нов.}$  и среднюю температуру поверхности теплоизоляции теплообменника  $A2$   $t_{cp}^{из.}$ :

$$t_{cp}^{нов.} = \frac{t_7 + t_8}{2} \quad (10.18)$$

$$t_{cp}^{из.} = \frac{t_9 + t_{10}}{2} \quad (10.19)$$

12. По потерям тепла  $Q_{потерь}^{A2}$ , используя закон теплопроводности для стационарного процесса, определить коэффициент теплопроводности материала теплоизоляции  $\lambda$ , Вт/(м·К):

$$\frac{Q_{потерь}^{A2}}{F_{из.}^{A2}} = \frac{\lambda}{\delta} (t_{cp}^{нов.} - t_{cp}^{из.}) \quad (10.20)$$

где  $\delta = 0,013$  – толщина слоя теплоизоляции, м;

$F_{из.}^{A2}$  – площадь внешней поверхности теплоизоляции, м<sup>2</sup>.

13. Сделать вывод о качестве теплоизоляции аппаратов.

14. Результаты вычислений занести в таблицу 10.3.

Таблица 10.3 – Результаты вычислений

№ п/п	Наименование	Обозначение	Теплообменник	
			A1	A2
1	Система		пар-жидкость	жидкость-пар
2	Поверхность теплообменника, м <sup>2</sup>	F		
3	Тепловая нагрузка (с учетом тепловых потерь), Вт	Q		
4	Средняя разность температур, °С а) противоток A2; б) прямоток A2	$\Delta t_{cp}^{A1}$ ; <i>прот</i> $\Delta t_{cp}$ ; <i>прям</i> $\Delta t_{cp}$		
5	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	K		
6	Отношение термических сопротивлений	K <sub>1</sub> /K <sub>2</sub>		
7	Коэффициент теплопроводности материала теплоизоляции, Вт/м·К)	$\lambda$		

#### Контрольные вопросы

1. Какие способы передачи тепла вы знаете?
2. Как разделяются по принципу действия теплообменные аппараты?
3. Понятия теплопередача и теплоотдача, в чем их различие?
4. Что понимается под скоростью теплового процесса?
5. Что является расчетной геометрической характеристикой теплообменного аппарата и с помощью какого управления она определяется?
6. Что является движущей силой теплового процесса и как определяется средняя движущая сила?
7. Что такое термическое сопротивление процесса теплопередачи, из каких составляющих оно складывается?
8. С помощью каких уравнений определяется тепловая нагрузка теплообменного аппарата и затраты энергии на проведение процесса?
9. Чем объясняется столь большая разница в площадях теплообмена испытанных теплообменников?

## Лабораторная работа № 11

### «Исследование зависимости коэффициента теплопередачи (теплоотдачи) между системами пар-жидкость от скорости движения жидкой среды»

*Цель работы:* экспериментальное исследование зависимости интенсивности теплоотдачи от скорости движения жидкости у теплообменной поверхности, представление полученных данных по теплоотдаче в критериальной форме и сравнение их с общепринятыми литературными.

*Задачи работы:*

1. Закрепить знания по теории теплообмена, способах переноса теплоты.
2. Изучить работу теплообменного оборудования.

Порядок проведения работы

1. Перед проведением работы инженер или преподаватель осуществляют пуск установки и вывод ее на стационарный режим при расходе воды 30 л/час.

2. При начале работы снять показания прибора, измеряющего входные и выходные параметры теплообменников А1 и А2 (в данной работе записываются только параметры, относящиеся к А1) и записать их в таблицу 11.1.

3. Установить расход воды, соответствующий следующему значению (рекомендуется 40 л/час).

4. Через 10 – 15 мин., после выхода установки на стационарный режим снимают показания прибора, относящиеся к теплообменнику А1 и записывают их в таблицу 11.1.

5. Далее аналогично, увеличивая расход воды на 10 л/час по выходу процесса на стационарный режим фиксируют параметры теплообменника А1 и заполняют таблицу 11.1.

Для завершения работы достаточным является 5 – 6 режимов.

Таблица 11.1 – Теплообменник А1

№ п/п	Объемный расход воды л/час	Массовый расход воды $G_B$ , кг/с	Температура, °С		
			конденсации пара	воды	
			$t_1$	ВХОД $t_2$	ВЫХОД $t_3$

6. Выполнить остановку установки в соответствии с указанной последовательностью.

### Обработка результатов измерений

1. Для каждого из режимов:

а) определить тепловую нагрузку теплообменника А2  $Q_g^{A1}$ , Дж/с:

$$Q_g^{A1} = G_B c_B (t_3 - t_2) \quad (11.1)$$

где  $c_B = 4186$  Дж/(м·к) – теплоемкость воды;

б) рассчитать удельную тепловую нагрузку (удельный тепловой поток)  $q$ , Дж/(с·м<sup>2</sup>):

$$q = \frac{Q_g^{A1}}{F_1} \quad (11.2)$$

где  $F_1$  – площадь поверхности теплообмена.

в) используя температурную схему определить большую  $\Delta t_6$ , меньшую  $\Delta t_m$  ( $\Delta t_6 = t_1 - t_2$ ,  $\Delta t_m = t_1 - t_3$ ) и среднюю разность температур теплоносителей  $\Delta t_{cp}$ , °С.

г) используя основное уравнение теплопередачи рассчитать коэффициент теплопередачи  $K_1$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K_1 = \frac{q}{\Delta t_{cp}} \quad (11.3)$$

2. Результаты вычислений занести в таблицу 11.2.

3. Пользуясь уравнением вычислить коэффициент теплоотдачи при конденсации пара  $\alpha_{конд}$  [Вт/(м<sup>2</sup>·К)] для всех режимов,

$$\alpha_{\text{конд.}} = 0,645 \cdot \lambda \cdot \left( \frac{\rho^2 \cdot r \cdot g}{\mu \cdot d_n} \right)^{\frac{1}{3}} q^{\frac{1}{3}} \quad (11.4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи при конденсации пара, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности конденсата, Вт/(м·К);

$\rho$  – плотность конденсата, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – вязкость конденсата, Н·с/м<sup>2</sup>;

$d_{\text{тр}}$  – наружный диаметр трубы, м;

$r$  – удельная теплота парообразования при температуре насыщения, Дж/кг;

$q$  – удельная тепловая нагрузка, Дж/(с·м<sup>2</sup>).

В уравнении (11.4) физические параметры  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  определяются при средней температуре конденсации пара  $t_1$  по справочным данным

Таблица 11.2 – Результаты вычислений

№ п/п	Тепловая нагрузка теплообменника A1 $Q_{\text{в}}$ , Дж/с	Удельная тепловая нагрузка, $q$ , Дж/(с м <sup>2</sup> )	Средняя разность температур, $\Delta t_{\text{ср}}$ , °С	Коэффициент теплопередачи $K$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)	Коэффициент теплоотдачи при конденсации пара $\alpha_{\text{конд}}$ , Вт/м <sup>2</sup> К	Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде $\alpha_{\text{ж}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)

4. Из выражения коэффициента теплопередачи  $K$  через коэффициенты теплоотдачи  $\left( K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \right)$  определяются для всех режимов

коэффициенты теплоотдачи от стенки к жидкости  $\alpha_{\text{ж}}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) (загрязнения стенки отсутствуют):

$$\alpha_{\text{ж}} = \frac{1}{\frac{1}{K} - \frac{1}{\alpha_{\text{конд}}} - \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}} \quad (9.5)$$

где  $\lambda_{ст} = 384 \text{ Вт/(м·К)}$  – коэффициент теплопроводности материала стенки (медь);  $\delta_{ст} = 0,0006 \text{ м}$  - толщина стенки трубы.

5. При средней температуре воды  $t_{ж} = \frac{(t_2 + t_3)}{2}$  по справочным данным определить теплофизические величины воды и занести их в таблицу 11.3.

Таблица 11.3 – Теплофизические величины воды

№ п/п	Средняя температура жидкости $t_{ж}$ , °С	Плотность воды $\rho_{ж}$ , кг/м <sup>3</sup>	Вязкость воды $\mu_{ж}$ , Па с	Коэффициент теплопроводности $\lambda_{ж}$ , Вт/(м К)	Теплоемкость воды $c_{ж}$ , Дж/(кг К0)

6. По величине расхода воды для всех режимов вычислить среднюю скорость воды в трубе теплообменника, м/с:

$$w_{жс} = \frac{4G_{в}}{\pi d_{вн}^2 \rho_{жс}} \quad (9.6)$$

7. Для каждого из режимов вычислить величины критериев:

$$Nu_{жс} = \frac{\alpha_{жс} d_{в}}{\lambda_{жс}} \quad (9.7)$$

$$Re_{жс} = \frac{w d_{в} \rho_{жс}}{\mu_{жс}} \quad (9.8)$$

$$Pr_{жс} = \frac{\mu_{жс} c_{жс}}{\lambda_{жс}} \quad (9.9)$$

занести их в таблицу 11.4 и по величине  $Re_{жс}$  определить режим течения среды.

Таблица 11.4 – Результаты вычислений

№ п/п	$Nu_{жс}$	$Re_{жс}$	$Pr_{жс}$	$Pr_{жс}^{0,43}$	$\frac{Nu_{жс}}{Pr_{жс}^{0,43}}$

8. Построить график этой зависимости в координатах  $\frac{Nu_{ж}}{Pr_{ж}^{0,43}} = f(Re_{ж})$  и нанести полученные экспериментальные значения величин для исследованных режимов.

#### Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависит интенсивность переноса тепла от теплообменной поверхности к потоку жидкости (газа) и наоборот?
2. В чем состоит закон теплоотдачи Ньютона?
3. Каков физический смысл коэффициента теплоотдачи?
4. Как определяется средняя движущая сила процесса теплообмена для исследованного случая изменения агрегатного состояния горячего теплоносителя.
5. При каких значениях критерия Рейнольдса режимы течения среды в трубе являются ламинарным, переходным, турбулентным?
6. Как определяется скорость течения жидкости в трубе?
7. Какие безразмерные комплексы называются определяющими критериями подобия?

#### Лабораторная работа № 12

##### **«Исследование зависимости коэффициента теплопередачи (теплоотдачи) между системами жидкость-газ от скорости движения газовой среды»**

*Цель работы:* экспериментальное исследование явления теплоотдачи от теплообменной поверхности к газовой среде, выявление ее особенностей и зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости движения газовой среды, представление полученных данных по теплоотдаче в критериальной форме и сравнение их с использующимися в расчетной практике.

*Задачи работы:*

1. Закрепить знания по теории теплообмена, способах переноса теплоты.
2. Изучить работу теплообменного оборудования

## Порядок проведения работы

1. Перед проведением работы инженер или преподаватель осуществляет пуск установки и вывод ее на стационарный режим при расходе воды 30 л/час и остающийся неизменным при проведении работы.

2. Ключ «воздух» переводится в положение «противоток» или «прямоток» по заданию преподавателя.

3. Регулятором расхода воздуха установить поток воздуха в межтрубном пространстве теплообменника А2 по перепаду давления на измерительной диафрагме (рекомендуется  $\Delta p \approx 700$  Па) с помощью вентиля ВР2.

4. Через 10 – 15 мин., после выхода процесса на стационарный режим снять показания прибора, измеряющего входные и выходные параметры теплообменников А1, А2 (в данной работе снимаются параметры относящиеся только к А2) и записать их в таблицу 1 (для  $t_5$  и  $t_6$  определить вход/выход в зависимости от заданной схемы движения теплоносителей в А2).

5. Далее аналогично, увеличивая расход воздуха на 50 Па (при неизменном расходе воды), по выходу процесса на стационарный режим зафиксировать параметры теплообменника А2 и записать в таблицу 12.1. Для завершения работы достаточным является 5 – 6 режимов.

6. Выполнить остановку установки в соответствии с указанной последовательностью.

Таблица 12.1 – Результаты измерений

№ п/п	Объемный расход воды, л/час	Массовый расход воды $G_v$ , кг/с	Перепад давления на диафрагме, Па	Массовый расход воздуха $G_{возд.}$ , кг/с	Температура, °С			
					вода		воздух	
					вход $t_3$	выход $t_4$	$t_5$	$t_6$

## Обработка результатов измерений

1. Для каждого из режимов:

а) определить тепловую нагрузку теплообменника  $A2 Q^{A2}$ , Дж/с (без учета тепловых потерь):

$$Q^{A2} = G_{\text{возд}} \cdot c_{\text{возд}} (t_3 - t_4) \quad (12.1)$$

где  $c_{\text{возд}} = 1005$  Дж/(кг·К) – теплоемкость воздуха;

б) рассчитать удельную тепловую нагрузку (удельный тепловой поток)  $q$ , Дж/(с·м<sup>2</sup>);

$$q = \frac{Q^{A2}}{F_2} \quad (12.2)$$

в) используя температурную схему определить большую  $\Delta t_6$ , меньшую  $\Delta t_m$  и среднюю разность температур теплоносителей  $\Delta t_{cp}$ , °С.

г) используя основное уравнение теплопередачи рассчитать коэффициент теплопередачи  $K_2$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K_2 = \frac{q}{\Delta t_{cp}} \quad (12.3)$$

2. Результаты вычислений занести в таблицу 12.2.

3. По величине расхода воды вычислить среднюю скорость воды в трубе теплообменника  $A2 \omega$ , м/с:

$$\omega = \frac{4 \cdot G_B}{\pi \cdot d_6^2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot n} \quad (12.4)$$

где  $n$  – число труб в трубном пучке теплообменника  $A2$ .

Таблица 12.2 – Результаты вычислений

№ п/п	Тепловая нагрузка теплообменника $A2 Q^{A2}$ , Дж/с	Удельная тепловая нагрузка $q$ , Дж/(с м <sup>2</sup> )	Средняя разность температур $\Delta t_{cp}$ , °С	Коэффициент теплопередачи $K_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)	Коэффициент теплоотдачи $\alpha_v$ , Вт/м <sup>2</sup> К)	Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{возд}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)

4. Вычислить критерий Рейнольдса и установить режим течения воды в трубе.

5. Пользуясь соответствующим режиму течения критериальным уравнением вычислить коэффициент теплоотдачи от воды к стенке  $\alpha_6$  [Вт/(м<sup>2</sup>·К)], считая его неизменным для всех режимов данного исследования, причем физические параметры в критериях  $Nu_{ж}$ ,  $Re_{ж}$ ,  $Re_{ж}$ ,  $Pr_{ж}$  определить при средней температуре горячей воды.

6. Из выражения коэффициента теплопередачи  $K$  определить для всех режимов коэффициенты теплоотдачи от стенки к воздуху  $\alpha_{возд}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_{возд} = \frac{1}{\frac{1}{K_2} - \frac{1}{\alpha_6} - \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}}} \quad (12.5)$$

7. При средней температуре воздуха  $t_{возд} = \frac{(t_5 + t_6)}{2}$  по справочным данным определить теплофизические свойства воздуха:  $\rho_{возд}$ ,  $\mu_{возд}$ ,  $\lambda_{возд}$ ,  $c_{возд}$ ,  $Pr_{г}$  и занести их в таблицу 12.3.

8. Вычислить площадь сечения межтрубного пространства теплообменника А2

$$S_{mp} = \frac{\pi}{4}(D_6^2 - n \cdot d_n^2) \quad (12.6)$$

Таблица 10.3 – Результаты вычислений

№ п/п	Средняя скорость воздуха $w_{возд}$ , м/с	Физические параметры воздуха					
		Средняя температура $t_{возд}$ , °С	Плотность $\rho_{возд}$ , кг/м <sup>3</sup>	Вязкость $\mu_{возд}$ , Па·с	Коэффициент теплопроводности $\lambda_{возд}$ , Вт/(м·К)	Теплоемкость $c_{возд}$ , Дж/(кг·К)	Критерий $Pr_{г}$

9. По величине расхода воздуха для всех режимов вычислить среднюю скорость его в межтрубном пространстве теплообменника А2  $w_{\text{возд}}$ , м/с:

$$w_{\text{возд}} = \frac{G_{\text{возд}}}{S_{\text{мр}} \rho_{\text{в}}} \quad (12.7)$$

10. Вычислить эквивалентный диаметр межтрубного пространства теплообменника А2  $d_{\text{экв}}$ , м:

$$d_{\text{экв}} = \frac{D_{\text{в}}^2 - n \cdot d_{\text{н}}^2}{n \cdot d_{\text{н}}} \quad (12.8)$$

11. Для каждого из режимов вычислить величины критериев подобия:

$$Nu_z = \frac{\alpha_{\text{возд}} d_{\text{экв}}}{\lambda_{\text{возд}}}, \quad Re_z = \frac{w_{\text{возд}} d_{\text{экв}} \rho_{\text{возд}}}{\mu_{\text{возд}}}, \quad Pr = \frac{\mu_z c_z}{\lambda z}$$

и занести их в таблицу 12.4.

Таблица 12.4 – Результаты вычислений

№ п/п	Nu	Re	Pr	$\lg \frac{Nu}{1,16 d_{\text{экв}} Pr^{0,23}}$	lgRe

12. Построить график зависимости  $\lg \frac{Nu_z}{1,16 d_{\text{экв}} Pr^{0,23}} = f(\lg Re)$  в логарифмических координатах, на который нанести полученные экспериментальные значения для исследованных режимов.

#### Контрольные вопросы

1. В чем особенности при теплоотдаче газов с теплопередающими поверхностями?
2. Как эти особенности сказываются на конструкциях теплообменных аппаратов?
3. Величина какого критерия подобия определяет в большей степени интенсивность теплоотдачи при вынужденном движении сред (газов или жидкостей) у теплообменной поверхности?

# МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

## Лабораторная работа № 13

### «Изучение гидродинамических явлений в тарельчатой колонне»

*Цель работы:* практическое ознакомление с устройством тарельчатой колонны и гидравлическими режимами ее работы.

*Задачи работы:*

1. Экспериментальное определение зависимости гидравлического сопротивления сухой тарелки от скорости газа в колонне.
2. Экспериментальное определение зависимости гидравлического сопротивления орошаемой тарелки от скорости газа в колонне.
3. Обработка результатов эксперимента.

#### Общие положения

Для проведения процессов массопереноса между газом (паром) и жидкостью (соответственно при абсорбции и ректификации) используют колонные массообменные аппараты.

Наиболее распространены насадочные и тарельчатые колонны, причем каждый тип имеет свою область применения. Так, насадочные колонны применяют, если требуется невысокое гидравлическое сопротивление по газовому потоку. Когда этот фактор не имеет существенного значения (ректификация при атмосферном и повышенном давлении), используют тарельчатые колонны.

Расчетными технологическими характеристиками являются:  $D_k$  – диаметр колонны;  $n_d$  – число реальных тарелок, обеспечивающее заданную степень разделения, высоту колонны  $H = n_d H_{\text{шт}}$ , (где  $H_{\text{шт}}$  – расстояние между тарелками);  $\Delta P$  – гидравлическое сопротивление единичной тарелки (полное гидравлическое сопротивление колонны  $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P n_d$ ).

Число тарелок  $n_d$  определяют в массообменном (технологическом) расчете, а диаметр колонны  $D_k$  и гидравлическое сопротивление  $\Delta P$  – в гидравлическом расчете.

В тарельчатых абсорбционных и ректификационных колоннах процесс массообмена между газовой (паровой) и жидкой фазами происходит на тарелках, которые разделяются на беспереливные, лишенные специальных переливных устройств для жидкости, где газ и жидкость проходят через отверстия в тарелке, и на тарелки с организованным переливом. Последние обладают широким диапазоном устойчивой работы и поэтому получили большое распространение.

Устройство тарелок с организованным переливом представлено на рисунке 13.1.

Тарелки состоят из приемного кармана для жидкости 1, рабочей части тарелки 2 и переливной планки 3. Приемный карман – это область тарелки, на которую поступает жидкость. Он обеспечивает гидравлический затвор, препятствующий проходу газа через переливной канал 5, и равномерное распределение жидкости по тарелке. По приемному карману жидкость ( $L$ ) с тарелки  $n + 1$  перетекает на тарелку  $n$  и равномерно растекается по рабочей части 2. На ней происходит барботаж – процесс прохождения газа через слой жидкости. В результате барботажа образуется динамический двухфазный слой, состоящий из пузырьков газа в жидкости с высокоразвитой поверхностью контакта фаз ( $300 - 1500 \text{ м}^2/\text{м}^3$  объема барботажного слоя) и весьма высокими коэффициентами массоотдачи. Переливная планка 3 задает определенную высоту слоя жидкости, через который происходит барботаж газа.

Газ ( $G$ ) поступает с низа тарелки вертикально, а жидкость движется в горизонтальном направлении от приемного кармана 1 через рабочую часть 2 к переливной планке 3 на следующую нижерасположенную тарелку, т. е. имеет место перекрестное движение газа и жидкости на тарелке.

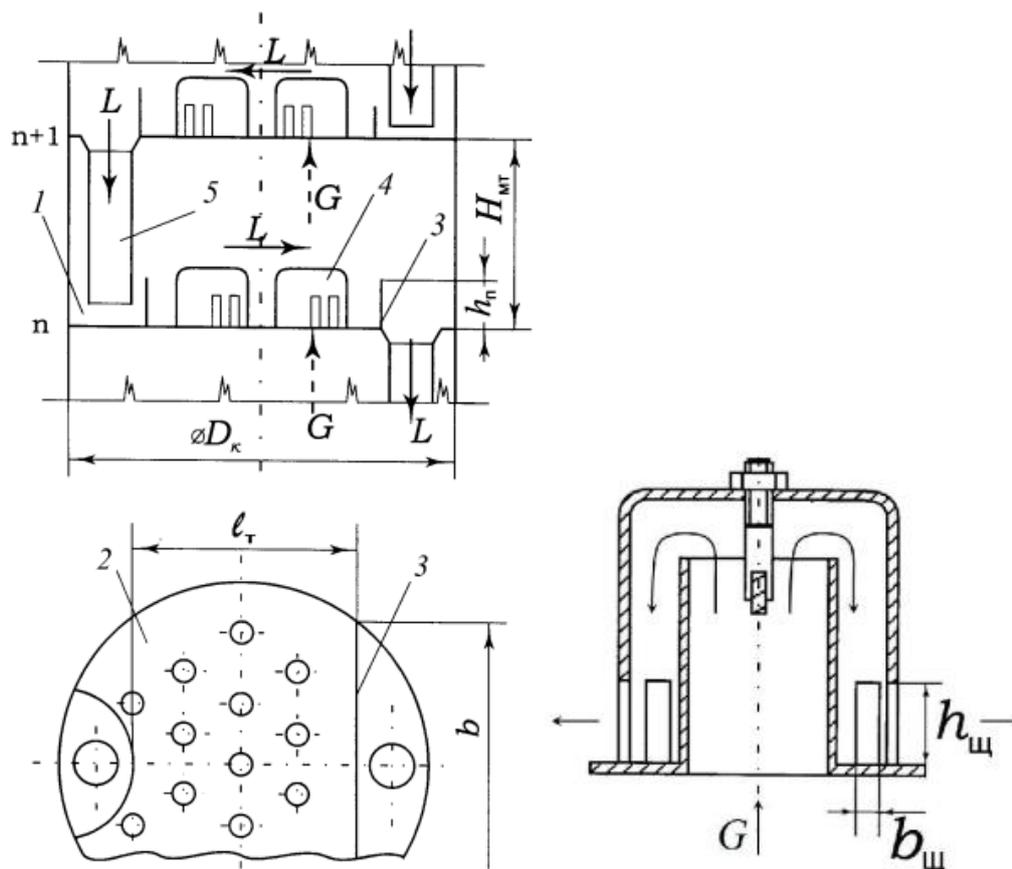


Рисунок 13.1 Схема колпачковой тарелки и колпачка:

- 1 – приемный карман; 2 – рабочая часть тарелки; 3 – переливная планка;  
4 – колпачок; 5 – переливное устройство

Тарелка, помимо диаметра  $D_k$  (равного диаметру колонны), характеризуется размерами (см. рисунок 13.1):  $H_m$  – межтарельчатое расстояние;  $H_n$  – высота сливной перегородки;  $b_{щ}$  – длина сливной перегородки;  $l_m$  – длина пути жидкости (расстояние от подпорной планки приемного кармана до сливной перегородки).

Конструкции рабочей части тарелки с организованным переливом заметно различаются, что влечет за собой изменение гидродинамических характеристик. Однако основное назначение рабочей части тарелки сохраняется неизменным: на ней происходит диспергирование газового потока в жидкости и образуется развитая поверхность массообмена. Возможен различный вид контактных элементов. Наиболее распространены колпачковые, ситчатые, клапанные тарелки.

В лабораторной работе изучается колпачковая тарелка. От других она

отличается устройством рабочей части, на которой расположены колпачки 4, обеспечивающие диспергирование газа в слое жидкости. Газ, проходя через патрубки, претерпевает сужение, затем поворот на  $180^\circ$ , проходит по кольцевому пространству между патрубком и собственно колпачком и выходит через многочисленные щели. Конструкцию характеризует существенное гидравлическое сопротивление газовому потоку.

Патрубок совместно с колпачком образуют гидрозатвор для жидкости. Протекание жидкости через колпачковое устройство не происходит. Это отличительная особенность, присущая колпачковым тарелкам.

На каждой тарелке экспериментальной колонны расположено по 10 колпачков, каждый из которых имеет по 15 прямоугольных прорезей размером  $b_{щ} \times h_{щ} = 3 \times 8 \text{ мм}$ .

Поток на любой тарелке с организованным переливом (рисунок 13.2) в гидравлическом отношении может рассматриваться как русловой поток, перегороженный «плотиной», причем «русловым потоком» является рабочая часть, а «плотиной» – сливная перегородка. Средняя высота «статического» слоя жидкости в таком потоке

$$h_{ст} = h_n + \Delta + \Delta_l / 2 \quad (13.1)$$

где  $\Delta$  – превышение жидкости над кромкой водослива;

$\Delta_l$  – гидравлический градиент уровня.

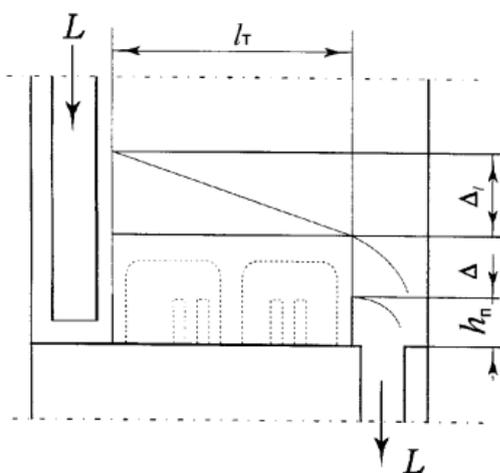


Рисунок 13.2 Схема к определению высоты статического слоя жидкости на тарелке

Гидравлический градиент обусловлен местными сопротивлениями и трением потока жидкости по жидкостному тракту. Он определяется известной формулой гидравлики

$$\Delta_l = \left( \lambda \frac{l_m}{d_s} + \sum \xi \right) \cdot \frac{w_l^2}{2 \cdot g} \quad (13.2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения;

$d_s$  – эквивалентный диаметр жидкостного потока;

$\sum \xi$  – суммарный коэффициент местных сопротивлений;

$w_l = \frac{L_{сек}}{h_{cl} \cdot b}$  – скорость жидкостного потока, текущего по тарелке;

$L_{сек}$  – секундный объемный расход жидкости на тарелке, м<sup>3</sup>/с.

При небольших значениях длины пути жидкости  $l_m$  и невысоких скоростях движения жидкости  $w_l$  величина гидравлического градиента  $\Delta_l$  невелика. Тогда ею пренебрегают. В данном случае также будем считать, что  $\Delta_l = 0$ , т.е.

$$h_{cl} = h_n + \Delta \quad (13.3)$$

Эта простая зависимость, справедливая как для однофазного, так и для двухфазного потока, имеет принципиальный характер для тарелок с организованным переливом. Важнейшая величина – высота слоя жидкости на тарелке, на которой происходит барботаж, определяется конструктивным фактором  $h_n$  и превышением жидкости  $\Delta$ , зависящим от нагрузки по жидкости  $L$ .

Тарельчатая колонна, как и любой противоточный аппарат, не может работать при любых нагрузках по газу и жидкости. Существует область устойчивой работы, где целесообразно использование переливных, в частности, колпачковых тарелок, ограниченная как минимальными, так и максимальными нагрузками.

Визуальные наблюдения показывают, что при изменении расхода газа характер барботажа существенно меняется.

При малых расходах газа тарелка работает неравномерно. Барботаж

газа происходит через часть колпачков или прорези колпачков не полностью открыты для прохода газа.

При увеличении расхода газа тарелка входит в равномерный режим, характеризующийся барботажем через все колпачки и полным открытием прорезей.

Дальнейшее увеличение расхода газа приводит к образованию все большего количества капель, выбрасываемых потоком газа из барботажного слоя в межтарельчатое пространство. При дальнейшем повышении расхода газа капли начинают интенсивно уноситься на вышерасположенную тарелку. Такой чрезмерный унос является нерабочим режимом, так как эффективность массообмена при этом резко уменьшается.

На рисунке 13.3 представлен диапазон устойчивой работы тарелки (заштрихован), ограниченный снизу неравномерной работой тарелки, а сверху – чрезмерным уносом жидкости. Нагрузка по жидкости выражается через интенсивность жидкостного потока  $L/b$  (горизонтальная ось), а нагрузка по газу – через скорость газа в полном сечении колонны  $w_k$  или через фактор газовой нагрузки  $F = w_k \cdot \sqrt{\rho_G}$ , где  $\rho_G$  – плотность газа (пара). При больших нагрузках по жидкости диапазон устойчивой работы тарелки может ограничиваться областью захлебывания. Это явление заключается в том, что нарушается нормальная работа сливного устройства; оно не может пропустить возросший поток жидкости и происходит затопление колонны.

Эксплуатация реальных промышленных абсорбционных и ректификационных колонн осуществляется в условиях постоянного отношения газового (парового) и жидкого потоков, т.е. при  $L/G = \text{const}$ , поэтому если увеличивается нагрузка по газу, то соответственно возрастает нагрузка по жидкости.



Рисунок 13.3 Диапазон устойчивой работы тарелки

На рисунке 13.3 изображены две траектории изменения нагрузок. При удельной нагрузке  $L/G = \lambda_1$  устойчивая работа тарелки будет ограничиваться отрезком  $A_1B_1$ , которому соответствуют скорости газа  $w_{kmax}$  и  $w_{kmin}$ . При более высокой удельной нагрузке по жидкости  $L/G = \lambda_2$  минимальная нагрузка будет определяться точкой  $A_2$ , а максимальная — захлебыванием (точка  $B_2$ ), однако, если несколько увеличить межтарельчатое расстояние  $H_{мт1}$  от до  $H_{мт2}$ , максимальная нагрузка будет определяться уже чрезмерным уносом.

Максимально допустимую скорость газа в полном сечении колонны, с учетом уноса, находят по формуле

$$w_{kmax} = C \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G}} \quad (13.4)$$

где  $C$  — эмпирический коэффициент, зависящий от  $h_{п}$  и  $H_{мт}$ ;

$\rho_L, \rho_G$  — плотности жидкости и газа соответственно.

Рабочую скорость принимают равной  $0,7 - 0,8$  от  $w_{kmax}$ . Минимально допустимую скорость  $w_{kmin}$  определяют по эмпирическим формулам. При расчете колонн  $w_{kmin}$  не представляет большого интереса, поскольку соотношение  $w_{kmax}/w_{kmin}$  довольно велико и составляет  $4 - 5$ .

Перемещение газа через колонный аппарат требует энергетических

затрат, которые определяются его гидравлическим сопротивлением. Оно равно гидравлическому сопротивлению единичной тарелки, умноженному на количество тарелок в колонне.

Полное гидравлическое сопротивление единичной тарелки состоит из суммы трех слагаемых: сопротивления сухой тарелки, сопротивления, обусловленного силами поверхностного натяжения, и сопротивления слоя жидкости

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_\sigma + \Delta P_{cl} \quad (13.5)$$

Сопротивление сухой тарелки

$$\Delta P_c = \xi \frac{w_{щ}^2}{2} \rho_G \quad (13.6)$$

где  $\xi$  – коэффициент сопротивления тарелки;

$w_{щ}$  – скорость газа на выходе из щелей (прорезей) колпачка, м/с;

$\rho_G$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

Скорость  $w_{щ}$  связана со скоростью газа в колонне  $w_k$  соотношением (уравнение расхода)

$$V_c = F_k w_k = f_{щ} n_{щ} w_{щ} \quad (13.7)$$

где  $F_k$  – площадь поперечного сечения колонны, м<sup>2</sup>;

$f_{щ} = b_{щ} h_{щ}$  – площадь единичной щели, м<sup>2</sup>;

$n_{щ}$  – количество щелей (прорезей) на тарелке;

$V_c$  – секундный объемный расход газа, м<sup>3</sup>/с;

$b_{щ}$  – ширина щели, м;

$h_{щ}$  – высота щели, м.

Ориентировочная суммарная площадь щелей ( $f_{щ}, n_{щ}$ ), отнесенная к площади поперечного сечения колонны  $F_k$ , составляет в реальных колпачковых тарелках 8 – 13 %.

Сопротивление, обусловленное силами поверхностного натяжения

$$\Delta P_{\sigma} = \frac{4\sigma}{d_{\text{эц}}} \quad (13.8)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

$d_{\text{эц}}$  – эквивалентный диаметр щели, м.

Примем  $d_{\text{эц}} = \frac{4f}{\Pi}$ , где  $f$  – поперечное сечение потока;  $\Pi$  – смоченный периметр. Поэтому  $d_{\text{эц}} = \frac{2b_{\text{щ}}h_{\text{щ}}}{b_{\text{щ}} + h_{\text{щ}}}$ .

Сопротивление слоя жидкости, находящейся на тарелке, определяют по уравнению водослива с учетом того, что по тарелке протекает двухфазный газожидкостной поток, а не однофазная жидкость.

$$\Delta P_{\text{ст}} = 1,3 \left[ k \left( h_n - \frac{h_{\text{щ}}}{2} \right) + \Delta \sqrt[3]{k} \right] \rho_L g \quad (13.9)$$

где  $k = \rho_{\text{GL}} / \rho_L$  – отношение плотностей двухфазной системы на тарелке и плотности жидкости (относительная плотность пены), которое равно 0,3–0,4;

$\Delta$  – превышение слоя жидкости над сливной перегородкой, которое определяют по уравнению водослива для однофазной жидкости

$$\Delta = \sqrt[3]{\left( \frac{L}{mb} \right)^2} \quad (13.10)$$

где  $L$  – объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/ч;

$b$  – длина сливной перегородки, м;

$m = 6400$  – коэффициент расхода водослива.

#### Описание установки

Лабораторная работа проводится на комплексной лабораторной установке для исследования гидродинамических и массообменных явлений на контактных устройствах массообменных аппаратов.

Схема активной части установки для данной лабораторной работы представлена на рисунке 13.4.

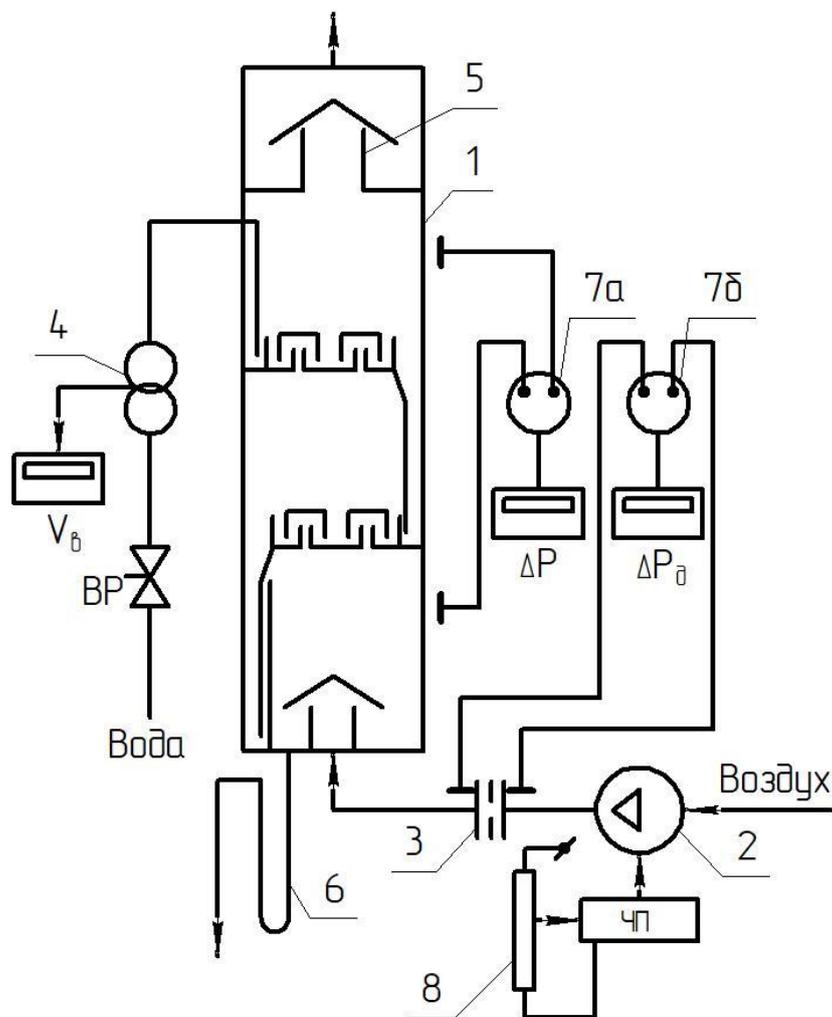


Рисунок 13.4 Схема лабораторной установки

Она состоит из тарельчатой колонны 1, воздуходувки 2, диафрагмы для измерения воздуха 3, ультразвукового импульсного счетчика 4 (300 импульсов/литр) для замера расхода воды. В верхней части колонна имеет брызгоотбойник 5. Вода сливается из аппарата через гидрозатвор 6. Перепады давления воздуха на измерительной диафрагме ( $\Delta P_0$ ) и тарелках ( $\Delta P$ ) колонны преобразуются в токовый сигнал 4 – 20 мА электронными дифманометрами 7а и 7б и отображается на микропроцессорных измерительных приборах щита КИП и управления. Расход воздуха регулируется плавноступенчатым переключателем 8 на щите управления посредством частотного преобразователя (ЧП), к которому подключен электродвигатель воздуходувки 2.

При испытании неорошаемой (сухой) тарелки вода не подается в

колонну. При испытании орошаемой тарелки включают подачу воды со щита управления, а расход ее ( $V_B$ ) определяется по показаниям микропроцессорного счетчика импульсов с ультразвукового расходомера воды 4.

Диаметр колонны 200 мм. Она имеет две колпачковые тарелки со съемными рабочими зонами. На каждой тарелке в рабочей зоне расположено по 10 колпачков диаметром 30 мм, каждый из которых имеет 15 прямоугольных прорезей размером  $b_{щ} \times h_{щ} = 3 \times 8$  мм. Длина периметра слива  $b = 138$  мм, высота сливной перегородки  $h_{п} = 30$  мм.

#### Порядок выполнения работы

Содержание экспериментальной части заключается в определении:

- 1) гидравлического сопротивления  $\Delta P_c$  сухой тарелки в зависимости от скорости газа  $w_k$ ;
- 2) полного гидравлического сопротивления орошаемой тарелки  $\Delta P$  при заданном орошении в зависимости от скорости газа  $w_k$ ;
- 3) визуальном наблюдении за изменением характера работы колпачковой тарелки: переходом от неравномерной работы колпачков к режиму равномерной работы; постепенным увеличением интенсивности образования брызг в межтарельчатом пространстве с ростом скорости газа  $w_k$ .

Поскольку в проводимом эксперименте нагрузка по жидкости остается постоянной, смена режимов на рисунке 13.3 будет происходить по линии MN.

1. Включить установку переключателем «Включение установки» (положение ВКЛ).
2. Переключатель выбора лабораторных работ поставить в положение «Тарельчатая колонна».
3. Наблюдать свечение светодиодных индикаторов вторичных приборов, измеряющих параметры данной работы.

4. Ступенчатым регулятором расхода воздуха установить начальный расход (рекомендуется положение регулятора б) воздуха и измеренные величины перепадов давления на измерительной диафрагме расхода воздуха и на тарелках колонны записать в таблицу 13.1.

5. Далее, ступенчато изменяя расход воздуха, провести измерения для всех расходов воздуха неорошаемой («сухой») колонны.

6. По завершении испытания «сухой» колонны переходят к испытаниям «орошаемой». Для этого возвращают ступенчатый переключатель расхода воздуха в начальное рекомендуемое положение.

7. Переключатель «Включение орошения» ставится в положение «ВКЛ», открывая доступ воды на орошение тарелок.

8. Расход воды устанавливается регулирующим вентилем ВР по вторичному прибору ультразвукового расходомера (рекомендуемый расход – 130 л/час).

9. Далее, ступенчато изменяя расход воздуха, произвести измерения необходимых параметров для всех расходов воздуха орошаемой колонны и записать в таблицу 13.1

Таблица 13.1 – Результаты измерений

№	Сухая колонна			Орошаемая колонна		
	Перепад давления на диафрагме $\Delta P_d$ , Па	Скорость воздуха, $w_k$ , м/с	Перепад давления на колонне $\Delta P_c$ , Па	Перепад давления на диафрагме $\Delta P_d$ , Па	Скорость воздуха, $w_k$ , м/с	Перепад давления на колонне $\Delta P_{op}$ , Па
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

$L =$  \_\_\_\_\_ кг/час

10. На основании полученных экспериментальных данных строят

графики  $\Delta P_c = f(w_k)$  и  $\Delta P_{op} = f(w_k)$  для одной тарелки.

Так как идентичных тарелок в колонне две, все экспериментальные значения  $\Delta P_c$  и  $\Delta P_{op}$  необходимо разделить на два.

Для определения  $w_k$  необходимо воспользоваться тарировочным уравнением, связывающим объемный расход воздуха  $V$  (м<sup>3</sup>/час) с перепадом давления  $\Delta P_\delta$  (Па) на измерительной диафрагме

$$V = 2,8\sqrt{\Delta P_\delta}, \text{ м}^3 / \text{ час} \quad (13.11)$$

Тогда скорость воздуха на свободное сечение колонны рассчитывают по уравнению

$$w_k = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D_k^2 \cdot 3600}, \text{ м} / \text{ с} \quad (13.12)$$

где  $D_k = 0,2$  м – диаметр колонны.

#### Обработка результатов эксперимента

##### 1. Определение коэффициента сопротивления колпачковой тарелки

На основании полученных экспериментальных данных, графика  $\Delta P_c = f(w_k)$  необходимо определить коэффициент сопротивления сухой колпачковой тарелки  $\xi$ .

Для двух-трех фиксированных значений скоростей газа  $w_{k1}, w_{k2}, \dots$  (в диапазоне  $w_k > 0,2$  м/с) из формулы (13.6) определяют величину  $\xi$ . Значения скорости газа в прорези колпачка  $w_{ш}$ , соответствующие скорости газа в колонне, определяют из уравнения расхода (13.7).

Полученные значения  $\xi_1, \xi_2, \dots$ , вычисленные для  $w_{k1}, w_{k2}, \dots$  усредняют, и в дальнейшем используют среднее значение коэффициента сопротивления  $\xi$ , пригодное для всего диапазона скоростей газа.

##### 2. Сопоставление экспериментального и расчетного значений полного сопротивления орошаемой тарелки

Сопоставление проводят для одной выбранной нагрузки по газу  $w_k$  в диапазоне  $w_k > 0,3$  м/с.

Экспериментальное значение  $\Delta P_{op}^o$  определяют из графика  $\Delta P_{op} = f(w_k)$ .

Расчетное значение полного гидравлического сопротивления  $\Delta P_{op}^p$  для скорости газа  $w_k$  находят по уравнениям (13.5) – (13.9), причем при определении  $\Delta P_c$  по уравнению (13.6) используют ранее полученное значение  $\xi$ .

Определяют сходимость значений  $\Delta P_{op}^p$  и  $\Delta P_{op}^p$ .

#### Контрольные вопросы

1. Какие типы тарелок существуют?
2. Для проведения каких процессов применяют тарельчатые колонны?
3. Из каких зон состоит тарелка с организованным переливом? Какие функции выполняет каждая из них?
4. Какие гидравлические режимы наблюдаются в тарельчатых колоннах при увеличении расхода газа?
5. От каких параметров зависит гидравлическое сопротивление сухой тарелки?
6. Какие параметры определяют сопротивление орошаемой тарелки?
7. Какие явления определяют устойчивую работу тарелки?

#### Лабораторная работа № 14

##### «Изучение гидродинамических явлений в насадочной колонне»

*Цель работы:* ознакомление с устройством и работой насадочной колонны.

*Задачи работы:*

1. Экспериментальное и расчетное определение зависимости гидравлического сопротивления слоя насадки от скорости газа в колонне для сухой и орошаемой насадки.
2. Определение экспериментальным и расчетным путем скорости захлебывания.
3. Обработка результатов эксперимента.

#### Общие положения

Для проведения процессов абсорбции и ректификации используют

насадочные колонны, которые представляют собой вертикальный цилиндрический аппарат, заполненный насадочными телами – насадкой.

Наибольшее распространение получила керамическая насадка в форме колец различного размера. Такую насадку называют кольцевой. Высота слоя насадки определяет рабочую высоту насадочной колонны.

В лабораторной работе изучается колонна с прозрачными стенками, в которую беспорядочно засыпана кольцевая насадка (кольца Рашига). Насадка в колонне размещена на поддерживающей решетке, которая служит опорой для насадки и имеет большое живое сечение для прохода газа и жидкости. Сверху насадка орошается жидкостью, которая равномерно распределяется по сечению колонны специальным устройством и движется вниз по поверхности насадки. Газ подается снизу под решетку и движется вверх. Таким образом, контакт газа и жидкости происходит в противотоке.

Контакт газа и жидкости в насадочной колонне, во время которого происходит обмен веществом и теплом между фазами, происходит, в основном, на смоченной поверхности насадки. Поверхность контакта фаз в насадочной колонне, через которую осуществляется массопередача, называют «активной поверхностью насадки». Она может быть как меньше, так и больше геометрической поверхности насадки, и величина ее зависит от расходов газа и жидкости. При малом расходе жидкости ее может не хватить для смачивания всей поверхности насадки, поэтому расход жидкости («величина орошения») должен обеспечивать полную смачиваемость всей поверхности насадки. При небольших расходах газа и жидкости трение между ними незначительно и количество удерживаемой жидкости не зависит от скорости газа. Контакт газа и жидкости происходит только на поверхности пленки жидкости, стекающей по насадке. Это, так называемый, пленочный режим.

С увеличением скорости газа возрастает трение между газом и жидкостью и, вследствие этого, происходит торможение жидкости: скорость стекания уменьшается, а толщина пленки жидкости увеличивается.

Возрастание количества жидкости в слое насадки ведет к уменьшению сечения для прохода газа, срыву пленки жидкости и возникновению явления барботажа. Это приводит к увеличению поверхности контакта фаз, которая становится больше геометрической поверхности насадки. Такой режим работы называют режимом подвисяния.

Дальнейшее увеличение скорости газа приводит к возрастанию количества жидкости в насадке до того момента, когда сила трения газа о жидкость уравнивает силу тяжести жидкости, находящейся в слое насадки. Этот момент характеризуется полным затоплением насадки и называется «точкой захлебывания». Работа промышленных насадочных колонн в «точке захлебывания» сопровождается значительными колебаниями гидравлического сопротивления вследствие неустойчивости течения газа и жидкости. Таким образом, скорость газа в «точке захлебывания» является предельной скоростью и, следовательно, рабочая скорость газа в насадочных колоннах должна быть меньше скорости в точке захлебывания.

Важным показателем работы насадочной колонны является гидравлическое сопротивление, которое определяет энергетические затраты на перемещение газа через аппарат и характеризует состояние насадки в колонне, от которого зависит течение процесса массообмена.

Насадка любого типа характеризуется:

- 1) удельной поверхностью  $a$ , представляющей собой полную геометрическую поверхность насадочных тел в единице объема насадки;
- 2) свободным удельным объемом насадки  $\epsilon$ , представляющим собой долю пустот в ней.

Величины  $a$  и  $\epsilon$  позволяют определить эквивалентный диаметр каналов в слое насадки

$$d_s = \frac{4\epsilon}{a} \quad (14.1)$$

который называют эквивалентным диаметром насадки.

При исследовании течения газа через насадку используют скорость

газа, отнесенную к полному сечению колонны

$$w_{\kappa} = \frac{V_z}{S_{\kappa}} \quad (14.2)$$

где  $V_z$  – секундный объемный расход газа, м<sup>3</sup>/с;

$S_{\kappa}$  – площадь поперечного сечения колонны, м<sup>2</sup>.

Эту скорость называют скоростью газа в колонне.

Кроме того, применяют скорость газа в каналах насадки, определяемую как

$$w = \frac{w_{\kappa}}{\varepsilon} \quad (14.3)$$

Эта скорость газа является истинной, или действительной, скоростью газа в насадке.

Гидравлическое сопротивление  $\Delta P_c$  сухой (не орошаемой жидкостью) насадки газовому потоку находят по уравнению

$$\Delta P_c = \xi \frac{H}{d_s} \cdot \frac{\rho_z w^2}{2} \quad (14.4)$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления насадки;

$H$  – высота слоя насадки, м;

$\rho_z$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент гидравлического сопротивления для кольцевых беспорядочных насадок при  $Re > 40$  вычисляют по уравнению

$$\xi = \frac{16}{Re^{0.2}} \quad (14.5)$$

где  $Re$  – критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{w \cdot d_s \cdot \rho_z}{\mu_z} \quad (14.6)$$

$\mu_z$  – динамическая вязкость газа, Па·с.

Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки при одной и той же скорости газа больше сопротивления сухой вследствие уменьшения свободного объема насадки при орошении. Для определения гидравлического сопротивления орошаемой насадки  $\Delta P_{op}$  используют

уравнение

$$\frac{\Delta P_{op}}{\Delta P_c} = 1 + 8,4 \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{0,4} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_{жс}}\right)^{0,225} \cdot \left(\frac{\mu_{жс}}{\mu_g}\right)^{0,05} \quad (14.7)$$

где  $L, G$  – массовые расходы жидкости и газа, кг/с;

$\rho_{жс}, \rho_g$  – плотности жидкости и газа, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_{жс}, \mu_g$  – динамическая вязкость жидкости и газа, Па·с.

Скорость захлебывания насадочной колонны (с кольцами, засыпанными навалом) может быть определена по формуле

$$\lg \left( \bar{\mu}^{0,16} \cdot \frac{w_3^2 \cdot a}{g \cdot \varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_{жс}} \right) = 0,022 - 1,75 \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_{жс}}\right)^{1/8} \quad (14.8)$$

где  $\bar{\mu} = \frac{\mu_{жс}}{\mu_g}$  – отношение динамической вязкости жидкости к

динамической вязкости воды;

$w_3$  – скорость газа в точке захлебывания.

Для расчета скорости захлебывания по предложенному уравнению следует выразить массовый часовой расход газа  $G$  через скорость захлебывания и решить уравнение (8) относительно скорости захлебывания.

#### Описание установки

Лабораторная работа проводится на комплексной лабораторной установке для исследования гидродинамических и массообменных явлений на контактных устройствах массообменных аппаратов. Схема активной части установки для данной лабораторной работы представлена на рисунке 14.1. Она состоит из колонны 1 с насадкой из колец Рашига, воздуходувки 2, диафрагмы для измерения расхода воздуха 3, ультразвукового импульсного счетчика 4 (300 импульсов/литр) для замера расхода воды. В верхней части колонна имеет брызгоотбойник 5. Вода сливается из аппарата через гидрозатвор 6. Перепады давления воздуха на измерительной диафрагме ( $\Delta P_d$ ) и насадке ( $\Delta P$ ) колонны преобразуются в токовый сигнал 4-20 мА электронными дифманометрами 7а и 7б и отображается на микропроцессорных измерительных приборах щита КИП и управления.

Расход воздуха регулируется плавноступенчатым переключателем 8 на щите управления посредством частотного преобразователя (ЧП), к которому подключен электродвигатель воздуходувки 2.

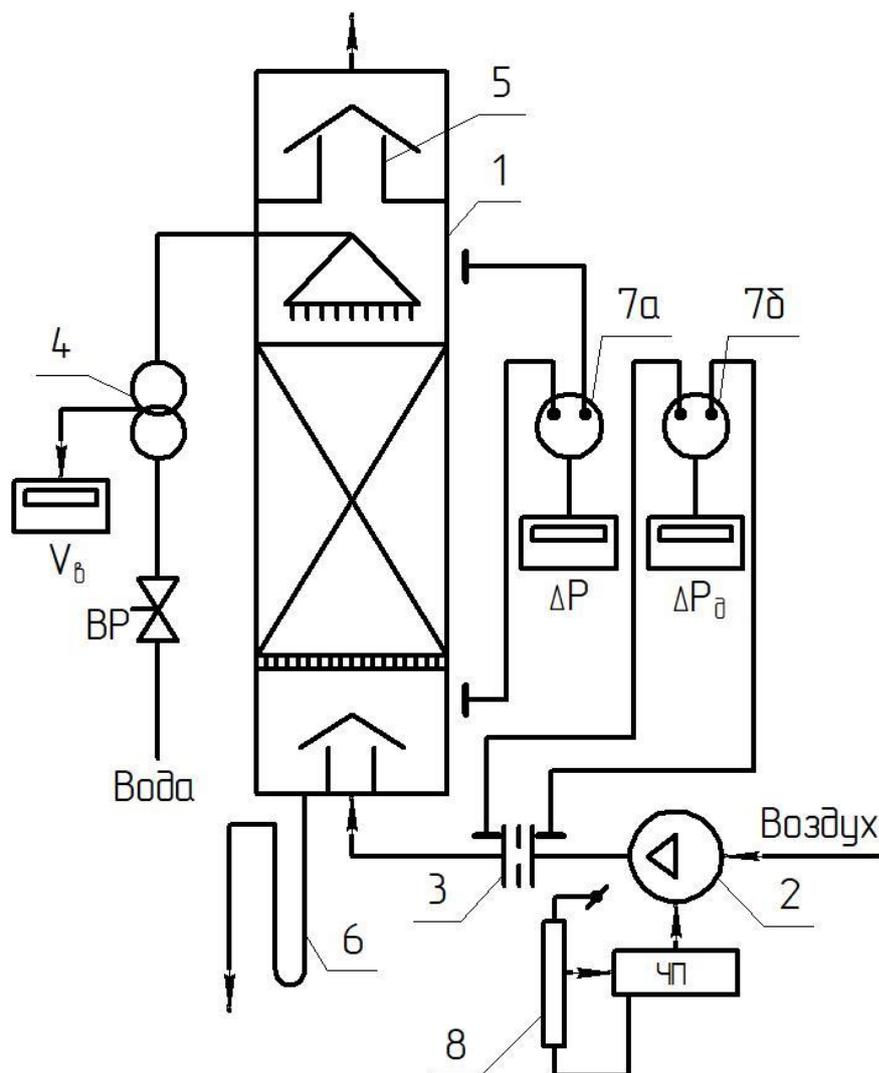


Рисунок 14.1 Схема лабораторной установки

При испытании неорошаемой (сухой) насадки вода не подается в колонну. При испытании орошаемой насадки включают подачу воды со щита управления, а расход ее ( $V_B$ ) определяется по показаниям микропроцессорного счетчика импульсов с ультразвукового расходомера воды 4.

Диаметр колонны – 200 мм, высота слоя насадки – 1200 мм, насадка – кольца Рашига 15x15x2 мм, удельная поверхность насадки  $a = 330 \text{ м}^2 / \text{м}^3$ , удельный свободный объем насадки (порозность) –  $\varepsilon = 0,6 \text{ м}^3 / \text{м}^3$ .

## Порядок выполнения работы

Экспериментальная часть работы состоит из двух серий опытов:

- гидравлические испытания «сухой» (неорошаемой) насадки;
- гидравлические испытания орошаемой насадки.

1. Включить установку переключателем «Включение установки» (положение ВКЛ).

2. Переключатель выбора лабораторных работ поставить в положение «Насадочная колонна».

3. Наблюдать свечение светодиодных индикаторов вторичных приборов, замеряющих параметры данной работы.

4. Ступенчатым регулятором расхода воздуха установить начальный расход (рекомендуется положение регулятора б) воздуха и измеренные величины перепадов давления на измерительной диафрагме расхода воздуха и на насадке колонны записать в таблицу 14.1.

5. Далее, ступенчато изменяя расход воздуха, провести измерения для всех расходов воздуха неорошаемой («сухой») колонны.

6. По завершении испытания «сухой» колонны переходят к испытаниям «орошаемой». Для этого возвращают ступенчатый переключатель расхода воздуха в начальное рекомендуемое положение.

7. Переключатель «Включение орошения» ставится в положение «ВКЛ», открывая доступ воды на орошение насадки.

8. Расход воды устанавливается регулировочным вентилем ВР по вторичному прибору ультразвукового расходомера (рекомендуемый расход – 250 л/час).

9. Далее, ступенчато изменяя расход воздуха, произвести измерения необходимых параметров для всех расходов воздуха орошаемой колонны и записать в таблицу 14.1.

10. Наблюдать явление «захлебывания» орошаемой насадочной колонны – накопление жидкости в объеме насадочных тел при определенной скорости газа. Это явление приводит к росту перепада давления на насадке

при постоянном расходе воздуха, что может превысить пределы измерения датчика и вторичного прибора и переход их в состояние «Ошибка». Для выхода из этого состояния достаточно уменьшить ступенчатым переключателем расход воздуха.

Таблица 14.1 – Результаты измерений

№	Сухая колонна			Орошаемая колонна		
	Перепад давления на диафрагме $\Delta P_d$ , Па	Скорость воздуха, $w_k$ , м/с	Перепад давления на колонне $\Delta P_c$ , Па	Перепад давления на диафрагме $\Delta P_d$ , Па	Скорость воздуха, $w_k$ , м/с	Перепад давления на колонне $\Delta P_{op}$ , Па
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

$L =$  \_\_\_\_\_ кг/час

#### Обработка результатов эксперимента

Обработку результатов эксперимента проводят в следующей последовательности:

1. По экспериментальным значениям скорости воздуха в колонне и гидравлического сопротивления сухой насадки строят график зависимости  $\Delta P_c$  от  $w_k$ .
2. По экспериментальным значениям скорости воздуха для определенного расхода жидкости строят график зависимости  $\Delta P_{op}$  от  $w_k$ .
3. Рассчитывают коэффициент сопротивления сухой и орошаемой насадки
4. Определяют скорость захлебывания, значение которой следует сравнить с экспериментально найденной величиной.

#### Контрольные вопросы

1. В чем состоит назначение насадки?

2. Какие типы насадок применяют в насадочных колоннах?
3. Назовите основные характеристики насадок.
4. Что называют удельным свободным объемом и удельной поверхностью насадки?
5. Для чего предназначено распределительное устройство? Какие конструкции распределительных устройств применяют в промышленных колоннах с насадкой?
6. Что понимают под скоростью газа в колонне и скоростью газа в каналах насадки?
7. Какие гидравлические режимы работы насадочных колонн наблюдают в зависимости от скорости газа?
8. Каково взаимное направление движения потоков газа и жидкости в насадочной колонне?

### **Лабораторная работа № 15**

#### **«Определение коэффициентов массо- и теплопередачи при контакте воздуха и воды на колпачковых тарелках массообменных колонных аппаратов»**

*Цель работы:* определение коэффициентов массо- и теплопередачи при контакте воздуха и воды на контактных устройствах – тарелках колонных аппаратов

*Задачи работы:*

1. Экспериментальное определение необходимых параметров.
2. Обработка результатов эксперимента.

#### Общие положения

При взаимодействии двух фаз (если система не находится в состоянии равновесия) происходит перенос вещества из одной фазы в другую (в данном случае вода в виде водяного пара переходит в газовую фазу – воздух).

Для стационарного процесса расход переносимого из фазы в фазу компонента определяют из основного уравнения массопередачи

$$M = K_{ym} \Delta y_{cp} F, \quad (15.1)$$

где  $M$  – расход переносимого из фазы в фазу компонента;

$\Delta y_{cp}$  – средняя движущая сила процесса;

$F$  – поверхность контакта фаз;

$K_{ym}$  – коэффициент массопередачи, характеризующий скорость переноса компонента из одной фазы в другую и являющийся величиной, обратной общему сопротивлению процесса массопередачи  $R_{ym}$ , т.е.

$$R_{ym} = 1 / K_{ym}.$$

Общее сопротивление процесса переноса компонента из фазы в фазу  $R_{ym}$  складывается из сопротивлений, участвующих в массопередаче фаз  $r_{1m}$  и  $r_{2m}$ .

$$R_{ym} = r_{1m} + r_{2m}. \quad (15.2)$$

Уравнение (15.2) может быть представлено в виде

$$\frac{1}{K_{ym}} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{A_p}{\beta_x}, \quad (15.3)$$

где  $R_{ym} = 1 / K_{ym}$ ,  $r_{1m} = 1 / \beta_y$ ,  $r_{2m} = A_p / \beta_x$ ;

$\beta_y$  – коэффициент массоотдачи в газовой фазе, характеризующий скорость переноса в ней компонента;

$\beta_x$  – коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, характеризующий скорость переноса в ней компонента;

$A_p$  – коэффициент уравнения равновесия  $y_p = A_p x$ ;

$y_p$  и  $x$  – соответственно концентрации компонента в газовой и жидкой фазах, находящихся в равновесии.

Для системы воздух-вода определяемый  $K_{ym}$  при испарении воды в воздух равен коэффициенту массоотдачи в газовой фазе  $\beta_y$ , так как диффузионное сопротивление в жидкой фазе равно нулю. Изложенный способ определения  $\beta_y$  используют при обследовании контактных устройств.

Экспериментально  $K_{ym}$  находят из уравнения (15.1), где  $F$  заменяется на  $F_6$  (площадь барботажа тарелки) из-за практической сложности точного

определения  $F$  для барботажных аппаратов

$$K_{\text{ум}} = \frac{M}{\Delta y_{\text{ср}} F_0} \quad (15.4)$$

Среднюю движущую силу  $\Delta y_{\text{ср}}$  рассчитывают по уравнению

$$\Delta y_{\text{ср}} = \frac{(y_{\text{рн}} - y_{\text{н}}) - (y_{\text{рк}} - y_{\text{к}})}{\ln \frac{y_{\text{рн}} - y_{\text{н}}}{y_{\text{рк}} - y_{\text{к}}}}, \quad (15.5)$$

где  $y_{\text{н}}$  и  $y_{\text{к}}$  – соответственно концентрации влаги в воздухе перед тарелкой и после нее, кг влаги/кг сухого воздуха;

$y_{\text{р}}$  – концентрация влаги в воздухе предельно насыщенного водяными парами (условие равновесия) при данной температуре, кг влаги/кг сухого воздуха;

$M$  – расход компонента, кг влаги/ч.

Использование уравнения (15.5) предполагает наличие полного перемешивания жидкости на тарелке.

При контакте двух сред (в данном случае воздух-вода), кроме переноса массы, происходит перенос тепла от среды с большей температурой к среде с меньшей температурой. Тепло тратится также и на обеспечение переноса влаги (испарение) в результате массообмена между фазами. От стационарного процесса теплопередачи количество передаваемого тепла определяется по основному уравнению теплопередачи

$$Q = K_{\text{т}} \Delta t_{\text{ср}} F, \quad (15.6)$$

где  $Q$  – количество тепла, передаваемого от одной среды к другой;

$\Delta t_{\text{ср}}$  – средняя разность температур сред, участвующих в теплопередаче (движущая сила);

$F$  – поверхность контакта сред;

$K_{\text{т}}$  – коэффициент теплопередачи, характеризующийся величиной, обратной общему сопротивлению процессу теплопередачи  $R_{\text{т}}$ .

Общее сопротивление процессу теплопередачи  $R_{\text{т}}$  складывается из

сопротивлений, участвующих в теплопередаче сред. Если число сред равно двум (воздух, вода), то

$$R_{\tau} = r_{\Gamma} + r_{\text{ж}}. \quad (15.7)$$

Уравнение (7) может быть представлено в виде

$$\frac{1}{K_{\tau}} = \frac{1}{\alpha_{\Gamma}} + \frac{1}{\alpha_{\text{ж}}}, \quad (15.8)$$

где  $R_{\tau} = \frac{1}{K_{\tau}}$ ;  $r_{\Gamma} = \frac{1}{\alpha_{\Gamma}}$ ;  $r_{\text{ж}} = \frac{1}{\alpha_{\text{ж}}}$ ;

$\alpha_{\Gamma}$  – коэффициент теплоотдачи в газовой фазе, характеризующий скорость переноса тепла в газе;

$\alpha_{\text{ж}}$  – коэффициент теплоотдачи в жидкой фазе, характеризующий скорость переноса тепла в жидкости.

Для системы воздух-вода  $\alpha_{\text{ж}}$  в среднем в 15-20 раз больше значения  $\alpha_{\Gamma}$ . Следовательно,  $K_{\tau} \cong \alpha_{\Gamma}$ , т.е. основное сопротивление процессу теплопередачи сосредоточено в газовой среде (воздухе).

Экспериментально значение  $K_{\tau}$  определяют на основе уравнения (15.6).

$$K_{\tau} = \frac{Q}{\Delta t_{\text{cp}} F_6}, \quad (15.9)$$

где истинная поверхность теплообмена  $F$  для барботажных аппаратов заменяется на  $F_6$  (площадь барботажа тарелки).

Среднюю разность температур определяют по уравнению

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{(t_{\Gamma\text{H}} - t_{\text{жк}}) - (t_{\Gamma\text{K}} - t_{\text{жк}})}{\ln \frac{t_{\Gamma\text{H}} - t_{\text{жк}}}{t_{\Gamma\text{K}} - t_{\text{жк}}}}, \quad (15.10)$$

где  $t_{\Gamma\text{H}}$  и  $t_{\Gamma\text{K}}$  – соответственно температуры воздуха на входе и выходе массообменного аппарата, °С;

$t_{\text{жк}}$  – температура жидкости (воды) на выходе с контактного устройства.

Согласно обычно принимаемой модели структуры потоков на контактных тарелках – полного перемешивания по жидкой фазе и полного

вытеснения по газовой (паровой) фазе,  $t_{\text{жн}}$  мгновенно меняется на  $t_{\text{жк}}$  и далее по всей площади барботажа остается постоянной.

#### Описание установки

Схема лабораторной установке показана на рисунке 15.1.

Основной аппарат установки – цилиндрическая колонна 1, выполненная из стеклянных царг с внутренним диаметром 200 мм и двумя колпачковыми тарелками 2. В верхней части колонны установлен брызгоотбойник 3. Вода подается в колонну через ультразвуковой счетчик 4 с импульсным выходом (300 импульсов/л), с помощью которого определяется объемный и массовый –  $L$ , кг/ч расход воды на орошение тарелок. Воздух в аппарат подается снизу. На трубопроводе подачи воздуха установлена диафрагма 5, по перепаду давления на которой определяется объемный  $V$ , м<sup>3</sup>/ч и массовый  $G$ , кг/ч расходы воздуха.

Установка оборудована датчиками и вторичными приборами для замера параметров сред, участвующих в тепло-массообменном процессе на тарелках колонны.

С помощью них определяются:

$t_{\text{жн}}$  – начальная температура воды (при входе на контактные тарелки колонны), °С;

$t_{\text{жк}}$  – конечная температура воды (при выходе с контактных тарелок), °С.

Для определения параметров воздуха, установка снабжена электронными гигрометрами, позволяющими измерять:

$t_{\text{гн}}$  – начальную (входную) температуру воздуха, °С;

$\varphi_{\text{н}}$  – начальную (входную) относительную влажность воздуха, %;

$t_{\text{гк}}$  – конечную (выходную) температуру воздуха, °С;

$\varphi_{\text{к}}$  – конечную (выходную) относительную влажность воздуха, %.

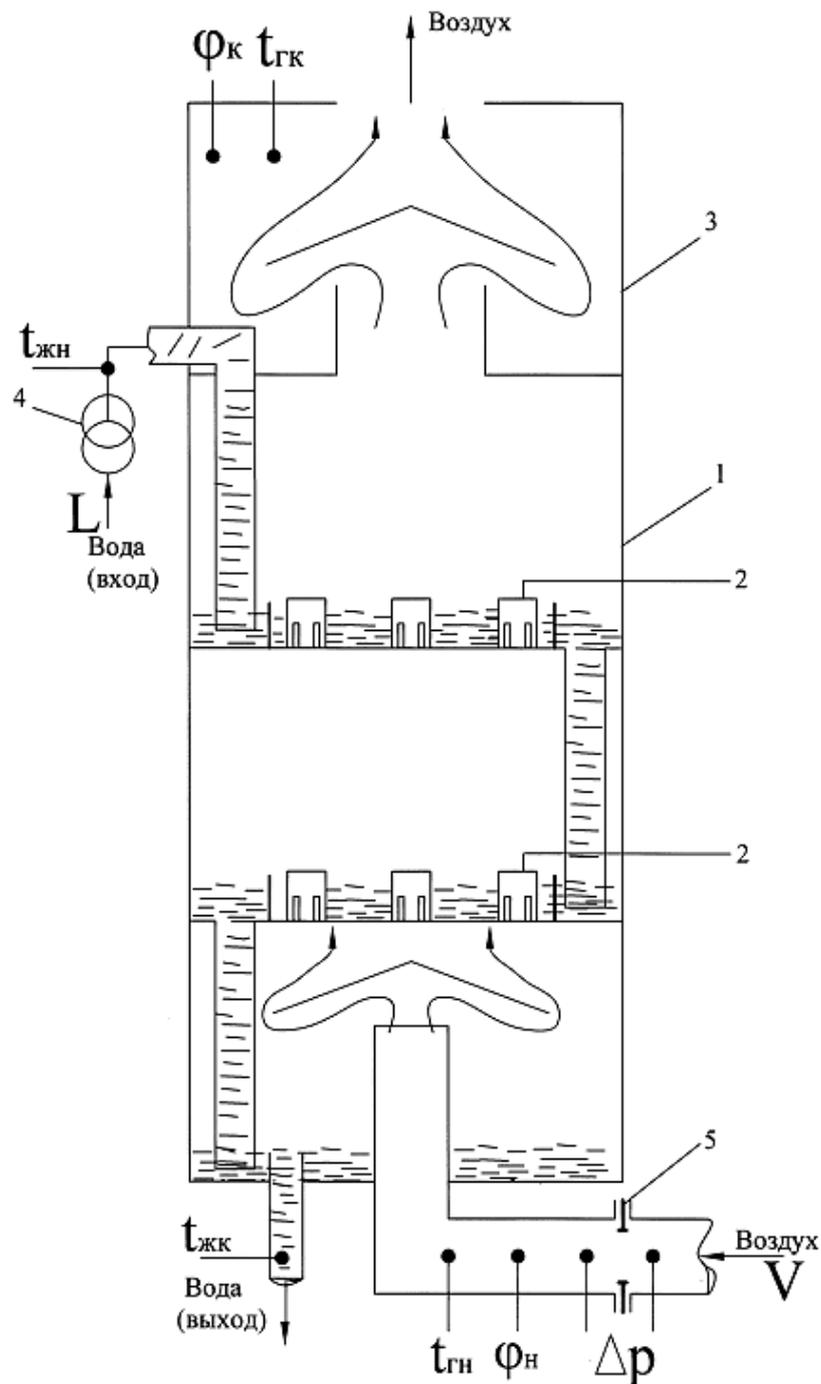


Рисунок 15.1. Схема лабораторной установки:

- 1 – цилиндрическая обечайка; 2 – колпачковые тарелки; 3 – брызгоотбойник;  
4 – счетчик расхода воды; 5 – измерительная диафрагма

Электронный барометр измеряет атмосферное барометрическое давление – В.

#### Порядок выполнения работы

Включают установку на щите управления. Ключ выбора лабораторной работы устанавливают в положение «теплообмен», при этом

включаются все вторичные измерительные приборы, воздуходувка и электроклапан подачи воды на контактные тарелки. Вентилем устанавливают определенный ее расход (~ 130 л/час – остается неизменным для всех режимов), с помощью ступенчатого регулятора и устанавливают определенный начальный расход воздуха.

После достижения устойчивого режима барботажа на тарелках газовой фазы в жидкую и стабилизации показаний измерительных приборов записывают рабочие параметры в таблицу по форме 15.1.

Таблица 15.1 – Результаты измерений

№ п/п	Перепад давления на диафрагме $\Delta P$ , Па	Воздух				Вода	
		$t_{гн}$ , °С	$\Phi_n$ , %	$t_{гк}$ , °С	$\Phi_k$ , %	$t_{жн}$ , °С	$t_{жк}$ , °С
1							
2							
3							
4							
5							

$B =$  \_\_\_\_\_ мм. рт. ст.  $L =$  \_\_\_\_\_ кг/ч

Далее с помощью ступенчатого переключателя изменяют расход воздуха и через 2 – 3 минуты записывают рабочие параметры процесса в таблицу 15.1 и так выполняют 5 опытов.

#### Обработка результатов экспериментов

1. Определение влагосодержания воздуха на входе в колонну –  $y_n$ , на выходе –  $y_k$ ,  $y_{рн}$  и  $y_{рк}$  – равновесных влагосодержаний воздуха соответственно на входе и выходе.

Влагосодержание воздуха  $y$  (кг влаги/кг сухого воздуха) определяют по уравнению

$$y = 0,622 \frac{\Phi P_c}{B - \Phi P_c}, \quad (15.11)$$

где  $\Phi$  – относительная влажность воздуха, равная отношению фактической массы водяных паров в воздухе к максимально возможной (равновесной) при данной температуре и давлении;

$P_c$  – давление насыщенных водяных паров, определяемое по температуре воздуха из табл. 2, мм. рт. ст.;

$B$  – атмосферное барометрическое давление, мм. рт. ст.

По этому уравнению для каждого проведенного опыта определяются:

$y_n$  – влагосодержание воздуха на входе, кг влаги/кг сухого воздуха;

$y_k$  – влагосодержание воздуха на выходе, кг влаги/кг сухого воздуха;

$y_{рн}$  и  $y_{рк}$  – соответственно равновесное влагосодержание на входе и выходе при  $\Phi = 1$ , кг влаги/кг сухого воздуха.

Таблица 15.2 – Давление водяного пара (в мм. рт. ст.)

Температура, °С	Давление	Температура, °С	Давление
1	4,926	26	25,209
2	5,294	27	26,739
3	5,685	28	28,349
4	6,101	29	30,043
5	6,543	30	31,824
6	7,013	31	33,695
7	7,513	32	35,663
8	8,045	33	37,729
9	8,609	34	39,898
10	9,209	35	42,175
11	9,844	36	44,565
12	10,518	37	47,067
13	11,231	38	49,692
14	11,987	39	52,442
15	12,788	40	55,324
16	13,634	41	58,34
17	14,530	42	61,50
18	15,477	43	64,80
19	16,477	44	68,26
20	17,535	45	71,88
21	18,650	46	75,65
22	19,827	47	79,60
23	21,068	48	83,71
24	22,377	49	88,02
25	23,756	50	92,51

Объемный расход воздуха определяют по перепаду давления  $\Delta P$  на измерительной диафрагме по уравнению

$$V = 2\sqrt{\Delta P}, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (15.12)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления на диафрагме, Па.

Скорость воздуха на свободное сечение аппарата рассчитывают по формуле

$$w = \frac{4V}{\pi \cdot 0,2^2 \cdot 3600}, \text{ м/с} \quad (15.13)$$

Массовый расход воздуха

$$G = V \cdot \rho_{\text{возд.}}, \text{ кг/ч} \quad (15.14)$$

где  $\rho_{\text{возд.}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Плотность воздуха определяется в зависимости от температуры и барометрического давления по формуле

$$\rho_{\text{возд.}} = 1,29 \cdot \frac{273 \cdot B}{T \cdot 760}, \quad (15.15)$$

где T – температура воздуха, К;

B – барометрическое давление, мм. рт. ст.

Результаты расчетов по каждому опыту заносятся в таблицу 15.3.

Таблица 15.3 – Результаты вычислений

№ п/п	Объемный расход воздуха V, м <sup>3</sup> /ч	Скорость воздуха на свободное сечение w, м/с	Массовый расход воздуха G, кг/ч	y <sub>н</sub>	$\frac{\text{кг влаги}}{\text{кг сух. воздуха}}$		
					y <sub>рн</sub>	y <sub>к</sub>	y <sub>рк</sub>
1							
2							
3							
4							
5							

2. Определение расхода испарившейся воды и составление теплового баланса контактных устройств (тарелок).

Массовый расход испарившейся воды в воздух

$$L_{\text{и}} = G(y_{\text{к}} - y_{\text{н}}), \text{ кг/ч} \quad (15.16)$$

где G – массовый расход воздуха, кг/ч.

Уравнение теплового баланса контактных устройств имеет вид:

$$Gc_{\Gamma}t_{\Gamma H} + Lc_{\text{ж}}t_{\text{жн}} = Gc_{\Gamma}t_{\Gamma K} + (L - L_n)c_{\text{ж}}t_{\text{жк}} + L(r_{\text{ж}} + c_{\text{п}}t_{\Gamma K}) + Q_n. \quad (15.7)$$

Левая часть уравнения – сумма потоков тепла, приходящих на контактные устройства:

$Gc_{\Gamma}t_{\Gamma H}$  – поток тепла с приходящим воздухом, кДж/ч,

где  $c_{\Gamma}$  – теплоемкость воздуха, равная  $1,005 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^{\circ}\text{C}}$ ;

$Lc_{\text{ж}}t_{\text{жн}}$  – поток тепла с приходящей водой, кДж/ч,

где  $c_{\text{ж}}$  – теплоемкость воды, равная  $4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^{\circ}\text{C}}$ .

Правая часть – сумма потоков тепла, уходящих с контактных устройств:

$Gc_{\Gamma}t_{\Gamma K}$  – поток тепла, уходящий с воздухом, кДж/ч;

$(L - L_n)c_{\text{ж}}t_{\text{жк}}$  – поток тепла, уходящий с водой, кДж/ч;

$L_n(r_{\text{ж}} + c_{\text{п}}t_{\Gamma K})$  – поток тепла, уходящий с испарившейся жидкостью, кДж/ч,

где  $r_{\text{ж}}$  – удельная теплота испарения воды при средней температуре ее на контактных тарелках, кДж/кг;

$c_{\text{п}}$  – теплоемкость водяного пара, равная  $1,97 \text{ кДж}/(\text{кг}^{\circ}\text{C})$ ;

$Q_n$  – потери тепла в окружающую среду, которыми в условиях данного эксперимента можно пренебречь;

$L$  – массовый расход воды, кг/ч.

3. Определение коэффициента массопередачи (равного коэффициенту массоотдачи в газовой фазе).

Коэффициент массопередачи вычисляют по уравнению (15.4) с использованием уравнения (15.5) для определения  $\Delta y_{\text{ср}}$ .

$$K_{\text{уср}} = \frac{L_{\text{и}}}{F_6 \frac{(y_{\text{рн}} - y_{\text{н}}) - (y_{\text{рк}} - y_{\text{к}})}{\ln \frac{y_{\text{рн}} - y_{\text{н}}}{y_{\text{рк}} - y_{\text{к}}}}} \quad (15.18)$$

где  $F_6 = 2 \cdot 0,025 = 0,05 \text{ м}^2$  – общая площадь барботажа (контакта воздуха и воды) двух тарелок колонны.

Результаты расчета  $K_{\text{уср}}$  для каждого опыта заносятся в таблицу 15.4.

Таблица 15.4 – Результаты вычислений

№ п/п	Массовый расход испарившейся влаги $L_{\text{и}}$ , кг/ч	Средняя движущая сила $\Delta u_{\text{ср}}$ , кг вл./кг сух. возд.	Средняя движущая сила $\Delta t_{\text{ср}}$ , °C	Коэффициент массопередачи $K_{\text{уср}}$ , кг / $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot (\text{кг вл./кг сух. возд.})$	Коэффициент теплопередачи $K_{\text{т}}$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}}$
1					
2					
3					
4					
5					

4. Определение коэффициента теплопередачи (равного коэффициенту теплоотдачи в газовой фазе).

Коэффициент теплопередачи вычисляют по уравнению (15.9) с использованием уравнения (15.10) и рисунка 15.2 для определения  $\Delta t_{\text{ср}}$ .

$$K_{\text{т}} = \frac{Gc_{\text{г}}(t_{\text{гн}} - t_{\text{гк}})}{F_6 \frac{(t_{\text{гн}} - t_{\text{жк}}^{\text{ср}}) - (t_{\text{гк}} - t_{\text{жк}}^{\text{ср}})}{\ln \frac{t_{\text{гн}} - t_{\text{жк}}^{\text{ср}}}{t_{\text{гк}} - t_{\text{жк}}^{\text{ср}}}}} \quad (15.19)$$

где  $t_{\text{жк}}^{\text{ср}}$  – средняя конечная температура воды, определяемая как

$$t_{\text{жк}}^{\text{ср}} = \frac{t_{\text{жк}}^1 + t_{\text{жк}}^2}{2}, \quad \text{для двух идентичных тарелок};$$

$t_{\text{жк}}^1 = t_{\text{жк}}$  – конечная температура воды после первой (нижней) тарелки;

$t_{\text{жк}}^2 = t_{\text{жн}}^1$  – конечная температура воды после второй (верхней) тарелки,

определяемая как  $t_{\text{жк}}^2 = \frac{t_{\text{жн}} + t_{\text{жк}}}{2}$ ;

$t_{\text{жн}}^1$  – начальная температура воды на первой (нижней) тарелке.

Результаты расчета  $K_t$  для каждого опыта заносятся в таблицу 15.4.

На рисунке 15.2 показан возможный характер изменения температур теплого воздуха и холодной воды на контактных тарелках по моделям полного вытеснения (ПВ) по воздуху и полного перемешивания (ПП) по воде. На испарение влаги из потока воды при массообмене требуется значительное количество тепла вследствие высокой величины удельной теплоты испарения воды (2493 кДж/кг при 0 °С). Тепло это переходит из потока воды вместе с испаренной влагой в воздух. Потеря тепла потоком воды должна быть скомпенсирована теплом потока воздуха при теплообменном процессе.

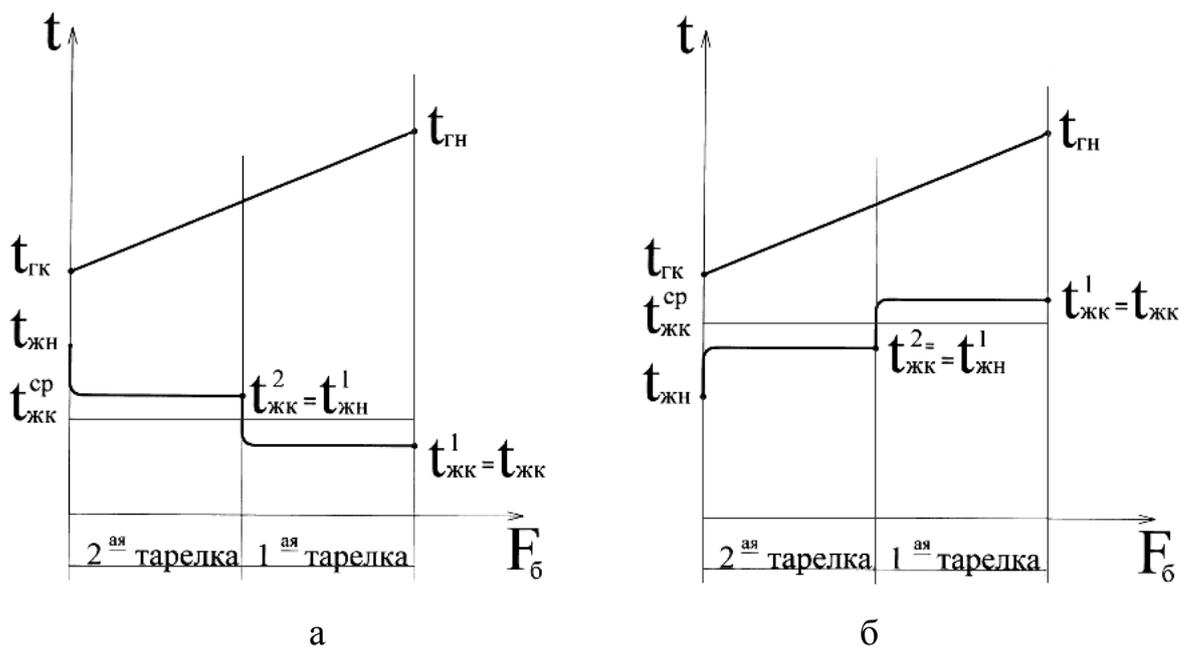


Рисунок 1 5.2 Характер изменения температур сред на контактных тарелках (ПВ – по воздуху, ПП – по воде):

а – при малых потоках тепла с воздухом; б – при больших потоках тепла с воздухом

При малых расходах воздуха (т.е. при малых потоках тепла с

приходящим воздухом) его тепла может оказаться недостаточно при тепло-массообмене для компенсации потерь тепла потоком воды на испарение.

В этом случае будет наблюдаться как понижение конечной температуры воздуха, так и понижение конечной температуры воды ( $t_{жк} < t_{жн}$ , рисунок 15.2а).

При больших расходах (потоках тепла) более теплого воздуха конечная температура воды выше начальной ( $t_{жк} > t_{жн}$ , 15.2б), так как его тепла будет достаточно для компенсации потерь тепла водой на испарение влаги и для ее нагревания выше начальной температуры.

#### Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл коэффициентов массопередачи, теплопередачи, массоотдачи и теплоотдачи?
2. Как выражается движущая сила массообменных и теплообменных процессов?
3. Для каких фаз на контактном элементе (тарелке) реализуются случаи: «полное (идеальное) перемешивание», «полное (идеальное) вытеснение»?
4. Какие элементы входят в экспериментальную установку?

#### Лабораторная работа № 16

##### «Изучение работы ректификационной установки»

*Цель работы:* ознакомление с работой ректификационной установки в режимах:

- а) без отбора дистиллята (флегмовое число  $R \rightarrow \infty$ );
- б) с отбором дистиллята ( $R = \text{const}$ )

*Задачи работы:*

1. Экспериментальное исследование распределения профиля температур и концентраций компонента разделяемой бинарной смеси по высоте (по тарелкам) ректификационной колонны.
2. Обработка результатов эксперимента.
3. Построение кинетической линии и определение коэффициента

массопередачи.

### Общие положения

Ректификацией называется процесс разделения однородных жидких смесей на составляющие вещества или группы веществ в результате противоточного взаимодействия паровой и жидкой фаз.

Возможность разделения жидкой смеси на составляющие ее компоненты ректификацией обусловлена тем, что состав пара, образующегося над жидкой смесью, отличается от состава жидкой смеси в условиях равновесного состояния фаз.

В процессе ректификации паровая фаза, многократно взаимодействуя с жидкой, обогащается компонентами (или компонентом) смеси, концентрация которых в паровой фазе превышает концентрацию их в жидкой при равновесном состоянии фаз. Эти компоненты (компонент) называются легколетучими компонентами смеси. В процессе многократного взаимодействия жидкая фаза обогащается тяжелолетучими компонентами и обедняется легколетучими.

Взаимодействие паровой и жидкой фаз происходит за время, значительно меньшее времени установления равновесия в системе жидкость-пар, следовательно, на ступенях контакта фаз равновесие не достигается.

Степень отклонения системы от равновесия является движущей силой процесса, выражаемой как разность равновесных и рабочих концентраций компонентов в паровой или жидкой фазах.

Рабочие концентрации компонентов в фазах на ступени взаимодействия определяются потоками компонентов из одной фазы в другую (легколетучих – из жидкой в паровую, тяжелолетучих – из паровой в жидкую). Поток переносимого компонента является функцией кинетического коэффициента, движущей силы и площади поверхности контакта фаз. Кинетический коэффициент, в свою очередь, определяется гидродинамической обстановкой на ступени взаимодействия фаз и их диффузионными свойствами.

Для увеличения площади поверхности контакта фаз используют

контактные устройства, на которых реализуют различные способы взаимодействия фаз. Наибольшее распространение в настоящее время получили тарельчатые ректификационные колонны, контактные устройства которых выполнены в виде ряда горизонтальных перегородок (тарелок), расположенных по высоте ректификационной колонны. Жидкая фаза последовательно, сверху вниз, перетекает с тарелки на тарелку, а паровая фаза, двигаясь вверх, взаимодействует на каждой тарелке с жидкой фазой.

По сравнению с другой колонной ректификационной аппаратурой тарельчатые колонны имеют ряд преимуществ:

- 1) широкий рабочий диапазон нагрузок по жидкой и паровой фазам;
- 2) значительная поверхность контакта фаз;
- 3) эффективная гидродинамическая обстановка на ступенях контакта;
- 4) сравнительно невысокий перепад давления на одной тарелке;
- 5) низкая удельная стоимость единицы объема аппарата.

Рабочая и равновесная линии процесса.

Выделим одну тарелку ректификационной колонны (см. рисунок 16.1).

На этой тарелке, с организованным сливом жидкости, паровая фаза барботирует через прорези в колпачках в жидкую фазу с изменением концентрации легколетучего компонента от  $y_n$  до  $y_k$ .

В свою очередь, жидкая фаза в процессе массообмена изменяет концентрацию от  $x_n$  до  $x_k$ . Если компонент является легколетучим, то  $y_n < y_k$ , а  $x_k < x_n$ . Принимают, что паровая фаза идеально вытесняется, а концентрация легколетучего компонента в ней монотонно увеличивается от  $y_n$  до  $y_k$ .

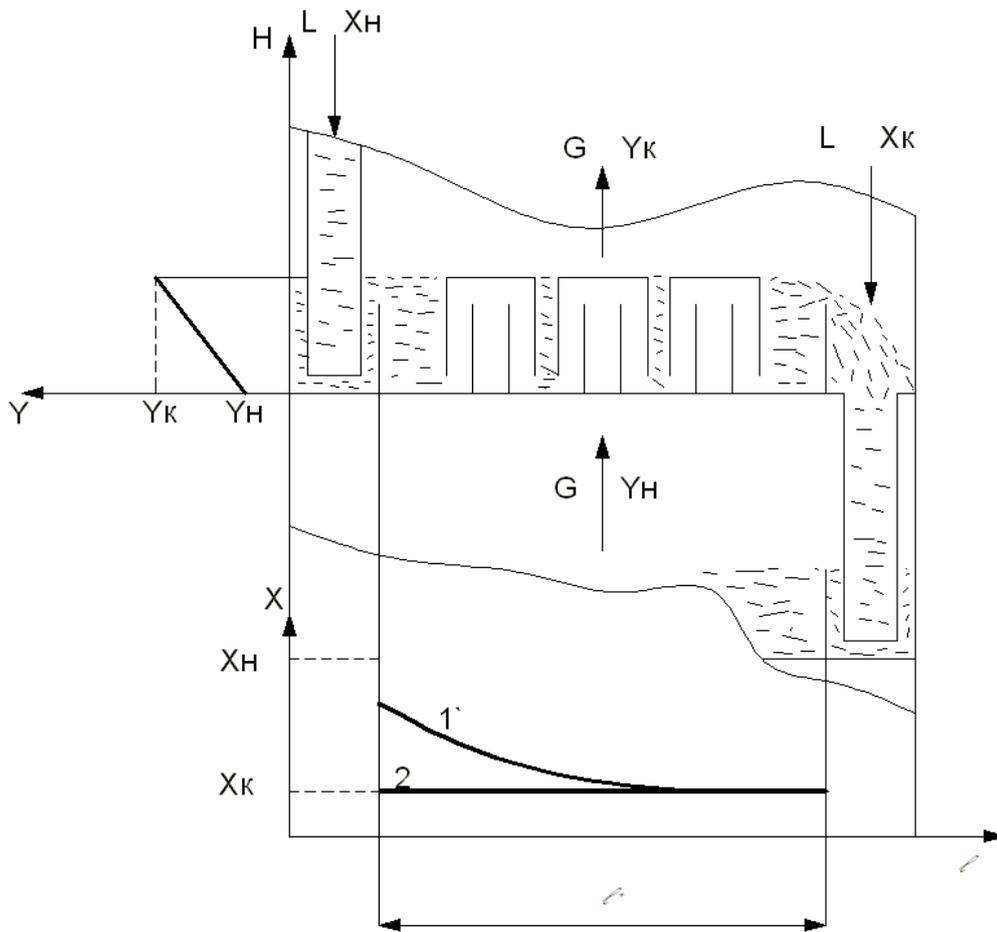


Рисунок 16.1 Расчетная схема контактной тарелки ректификационной колонны

На тарелках промышленных размеров существует градиент концентраций компонента в жидкой фазе вдоль пути ее движения от приемного кармана к сливному (кривая 1, рисунок 16.1). Однако в целях упрощения расчета принимают, что жидкая фаза идеально перемешана на тарелке, концентрация легколетучего компонента скачком меняется на входе от  $x_H$  до  $x_K$ , и на всем пути  $l_{ж}$  движения жидкости значение  $x_K$  не меняется (линия 2, рисунок 16.1).

При взаимодействии фаз на тарелке равновесное состояние между ними не достигается. Изменение концентраций фаз на тарелке может быть представлено графически для бинарной смеси (ступень T, рисунок 16.2).

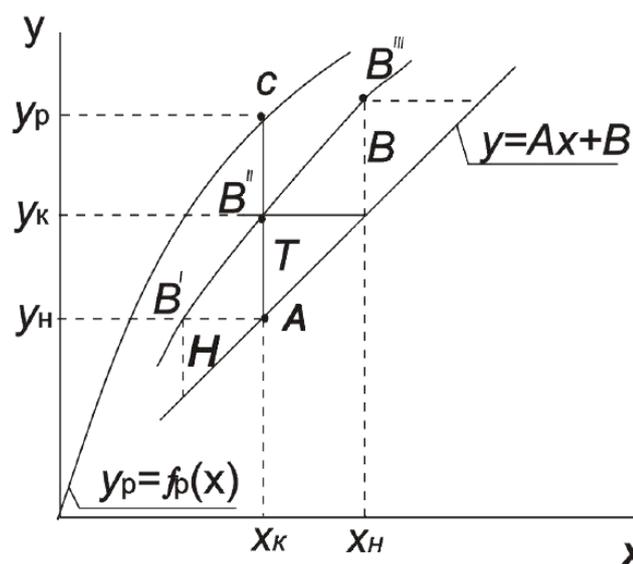


Рисунок 16.2 К расчету концентраций фаз на тарелке ректификационной колонны

Соответственно изменение концентраций на верхней тарелке выразится как ступень В, а нижней – Н. Кривая, соединяющая точки В', В'', В''' называется кинетической линией процесса, показывает степень недостижения равновесия и отвечает уравнению связи  $y_k$  и  $x_k$  для каждой тарелки.

На рисунке 16.2 нанесены также линии связи равновесных концентраций  $y_p = f(x)$  и рабочая  $y = Ax + B$ , отвечающая условию материального баланса и связывающая на любой тарелке  $y_n$  и  $x_k$ .

При  $R \rightarrow \infty$  для обогащающей части ректификационной колонны мольный расход паровой фазы  $G$  (кмоль)/ч равен мольному расходу жидкой фазы  $L$  (кмоль)/ч. Из уравнения материального баланса тарелки (рисунок 16.1) следует равенство (16.1)

$$y_k - y_n = x_n - x_k, \quad (16.1)$$

которое справедливо в случае, когда рабочая линия  $y = Ax + B$  лежит на диагонали квадрата диаграммы  $y-x$ . Таким образом в режиме  $R \rightarrow \infty$   $y_n = x_k$ , а  $y_k = x_n$ .

Положение кинетической линии процесса ректификации определяется

кинетическим коэффициентом процесса – коэффициентом массопередачи  $K_y(K_x)$ , (кмоль)/(м<sup>2</sup>ч).

$$K_y = \frac{G_M(y_k - y_n)}{F_0 \Delta u_{cp}} \quad (16.2)$$

где  $G_M$  – мольный расход паровой фазы, (кмоль)/ч;

$y_k, y_n$  – конечная и начальная концентрации легколетучего компонента в паровой фазе на тарелке, мол. доля;

$F_0$  – площадь барботажа тарелки, м<sup>2</sup>;

$\Delta u_{cp}$  – средняя движущая сила.

Средняя движущая сила для тарелки Т составляет

$$\Delta u_{cp} = \frac{(y_p - y_k) - (y_p - y_n)}{\ln \frac{y_p - y_k}{y_p - y_n}} \quad (16.3)$$

где  $y_p$  – концентрация легколетучего компонента в паровой фазе, находящейся в равновесии с жидкой фазой состава  $x_k$ , мол. доли (рисунок 16.1).

Данные парожидкостного равновесия для смеси этанол-вода приведены в таблице 16.1.

Таблица 16.1 – Данные парожидкостного равновесия для смеси этанол-вода

Концентрация этилового спирта в жидкой фазе, $x$ , % мол.	Концентрация этилового спирта в паровой фазе, $y$ , % мол.	Температура кипения смеси, $t_k$ , °С
0	0	100
1,9	17	95,5
7,21	38,91	89
9,66	43,75	86,7
12,38	47,04	85,3
16,61	50,89	84,1
23,37	54,45	82,7
26,08	55,8	82,3
32,73	58,26	81,5
39,65	61,22	80,7
50,79	65,64	79,8
51,98	65,99	79,7
57,32	68,41	79,3
67,63	73,85	78,74
74,72	78,15	78,41
89,43	89,43	78,15

## Описание установки

Схема ректификационной установки приведена на рисунке 16.3.

Ректификационная колонна состоит из куба с электрическим подогревом, стеклянных прозрачных царг, во фланцевых соединениях которых смонтированы колпачковые тарелки. Рабочая площадь барботажа тарелки  $F_6 = 0,157 \text{ м}^2$ , высота сливной перегородки 30 мм.

В рабочей зоне всех тарелок расположены термометры сопротивления типа ТСМ-50М для замера температуры кипения жидкости на всех тарелках.

Дефлегматор установки (ДФ) – одноходовых кожухотрубный теплообменник с поверхностью теплообмена  $F_6 = 1,5 \text{ м}^2$ .

Паровая фаза из колонны подаётся для конденсации в межтрубное пространство дефлегматора, где она конденсируется, и конденсат с целью уменьшения потерь этанола переохлаждается. Тепло конденсации паровой фазы отводят охлаждающей водой, движущейся в трубках дефлегматора. Температура воды на входе и выходе, поступающего пара и конденсата замеряется термометрами сопротивления типа ТСМ-50. Конденсат стекает во флегмоделитель (ФД).

При такой схеме колонна работает как обогащающая часть промышленной ректификационной колонны. Такие колонны (без исчерпывающей части) распространены в нефтеперерабатывающей промышленности.

Пусковой режим осуществляется в следующей последовательности.

Включают подачу охлаждающей воды в дефлегматор (переключателем на щите управления, а регулирование расхода воды вентилем ВР2 по прибору на щите КИП).

Вентиль отбора дистиллята ВР1 закрывают.

Включают подогрев куба (кнопка «пуск-стоп») на щите управления. Ступенчатым переключателем устанавливают необходимую мощность нагрева.

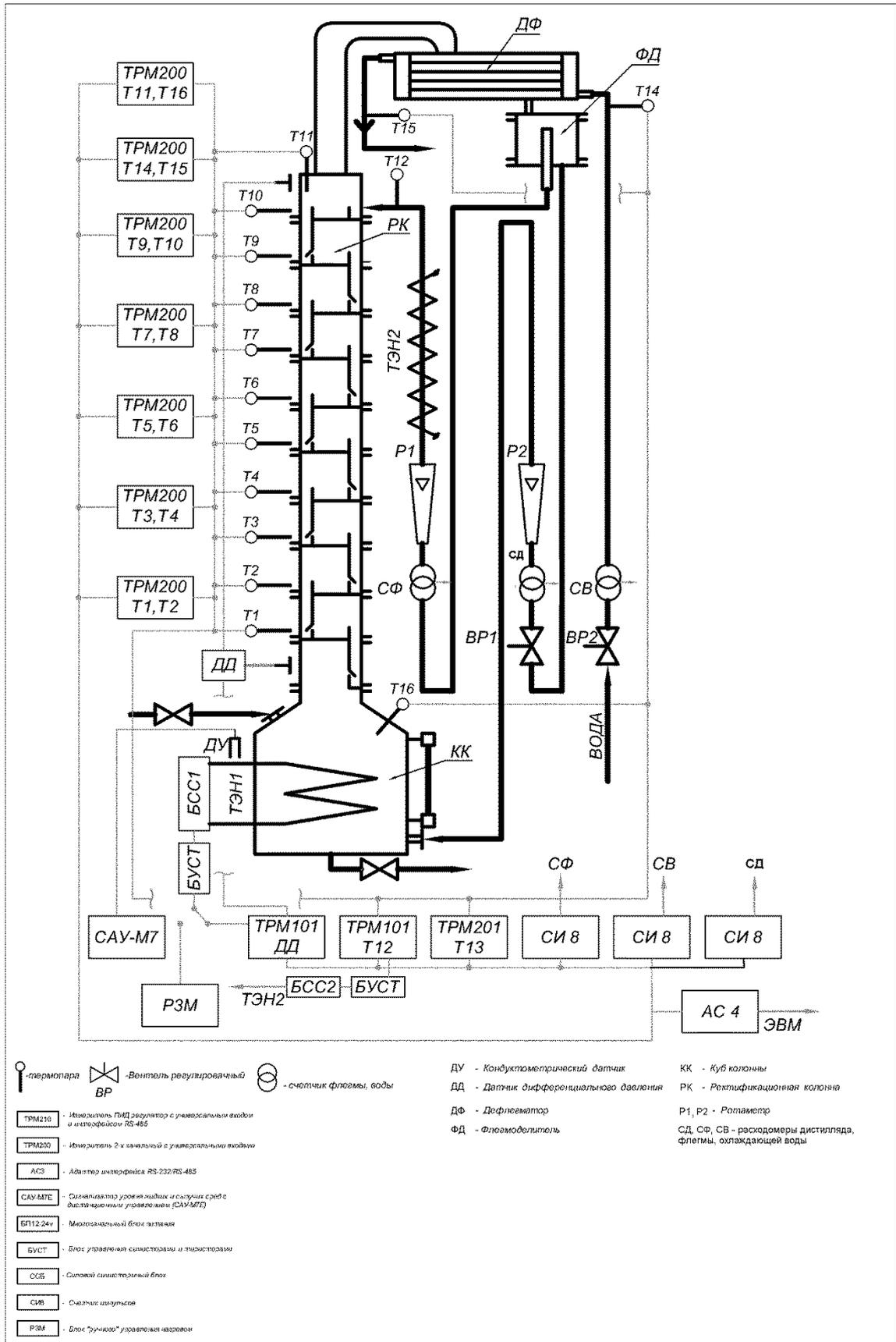


Рисунок 16.3 Схема ректификационной колонны

После нагрева жидкости в кубе до температуры кипения начинается процесс интенсивного парообразования. Образующаяся паровая фаза проходит последовательно через все тарелки колонны, прогревает их последовательно, и попадает в дефлегматор, где конденсируется. Дистиллят из дефлегматора стекает во флегмоделитель ФД, создаёт напорный уровень жидкости во флегмоделителе и по центральному трубопроводу через ультразвуковой расходомер, ротаметр Р2, подогреватель флегмы ТЭН2 вводится на десятую тарелку колонны.

Жидкая фаза стекает с верхней тарелки вниз, проходит по переливным устройствам последовательно все тарелки колонны и взаимодействует с паровой фазой.

Постоянство профиля температур жидкой фазы по высоте колонны во времени свидетельствует о постоянстве профиля концентраций. Последнее означает, что колонна вышла на режим полного орошения ( $R \rightarrow \infty$ ), т.е. работает без отбора дистиллята (смеси, обогащенной легколетучим компонентом).

Для этого режима ( $R \rightarrow \infty$ ) характерно равенство массовых расходов паровой и жидкой фаз. Такой режим используют в промышленных колоннах в процессе пуска колонны и для работы колонны (определения профиля температур и концентраций по высоте колонны). Если на выходе на режимные параметры колонна продолжит работать при  $R \rightarrow \infty$ , то на верхних тарелках начнётся накопление азеотропной смеси, потому после установки режимных параметров при  $R \rightarrow \infty$  колонну переводят в рабочий режим с отбором дистиллята. Для этого открывают вентиль ВР1 отбора дистиллята и его величиной удерживают постоянство профиля температур жидкой фазы по высоте колонны.

#### Порядок выполнения работы

После выхода колонны на стационарный режим проводят замеры основных технологических параметров, значения которых заносят в таблицы по формам 16.2 и 16.3.

Таблица 16.2 – Экспериментальные данные

Температуры на дефлегматоре °С				Расход охл. воды, W		Расход флегмы L <sub>ф</sub>		Расход дистиллята, L <sub>д</sub>	
Пар t <sub>п</sub>	Конденсат t <sub>конд</sub>	Вода		л/ч	кг/ч	л/ч	кг/ч	л/ч	кг/ч
		t <sub>в.вх.</sub>	t <sub>в.вых.</sub>						

Таблица 16.3 – Экспериментальные данные

Температура кипения жидкости на тарелке, °С										
t <sub>10</sub>	t <sub>9</sub>	t <sub>8</sub>	t <sub>7</sub>	t <sub>6</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>f</sub>
Концентрация этанола в жидкости, уходящей с тарелки, мол. доля										
x <sub>10</sub>	x <sub>9</sub>	x <sub>8</sub>	x <sub>7</sub>	x <sub>6</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>f</sub>

В таблицу 16.3 записывают концентрации, определяемые по соответствующим температурам кипения жидкости на тарелках (по аппроксимационной зависимости  $x = f(t)$  или по её графическому представлению, а по температуре кипения жидкости в кубе колонны –  $t_f$  определяют величину  $x_f$ .

#### Обработка результатов измерений

1. Проверяют сходимость теплового баланса дефлегматора,  $Q_1 = Q_2$ , где  $Q_1$  – тепловой поток, получаемый водой в дефлегматоре

$$Q_1 = W c_v (t_{v,вых} - t_{v,вх}), \quad (16.4)$$

а  $Q_2$  – тепловой поток, отдаваемый конденсирующимся паром и переохлажденным дистиллятом

$$Q_2 = r (L_{ф} + L_{д}) + (L_{ф} + L_{д}) C_{д} (t_{п} - t_{конд}), \quad (16.5)$$

В уравнениях (16.4) и (16.5)

$W, L_{ф}, L_{д}$  массовые расходы охлаждающей воды, флегмы и дистиллята, кг/ч;

$C_v = 4,19$  кДж/кг·К – теплоемкость воды;

$C_{д} = 2,95$  кДж/кг·К – теплоёмкость дистиллята (70-80 % мас. ‘танола в воде);  $t$

$t_{п}$  – температура пара;

$t_{\text{конд}}$  – температура переохлажденного дистиллята.

2. Если на момент эксперимента колонна работала с отбором дистиллята, определяют величину флегмового числа  $F = \frac{L_{\text{ф}}}{L_{\text{д}}}$

3. Строят диаграмму у-х (в полных долях или мольных процентах), проводят диагональ квадрата диаграммы (её уравнение  $y = x$ ), по представленным в таблице 16.1 равновесным данным строят равновесную кривую.

4. Далее:

а) если экспериментальные данные получены при работе колонны в режиме  $R \rightarrow \infty$  рабочей линией является диагональ диаграммы (уравнение  $y = x$ );

б) если экспериментальные данные получены при работе колонны с отбором дистиллята, то рабочую линию строят по уравнению

$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_{\text{д}}}{R+1}$  ( $x_{\text{д}} = x_{10}$ ). Для этого по концентрации жидкости  $x_{10}$  определяют положение точки 1 на диагонали квадрата, а по величине отрезка  $B = \frac{x_{10}}{R+1}$  и концентрации этанола в кубовой жидкости –  $x_{\text{р}}$  определяют положение точки 2. Отрезок 1-2 – рабочая линия процесса ректификации при работе с отбором дистиллята.

5. По значениям  $x_9, x_8, x_7 \dots x_5$  строят в координатах у-х кинетическую линию процесса (рисунок 16.4 или 16.5)

6. Для одной, двух или трех тарелок по уравнению (16.2) определяют коэффициенты массопередачи  $K_y$  (с указанными размерностями входящих в расчетное уравнение величин). При этом мольный расход паровой фазы  $G_{\text{м}}$  составит  $G_{\text{м}} = \frac{L_{\text{ф}} + L_{\text{д}}}{M_{\text{ср}}}$ , кмоль/час.

$M_{\text{ср}} = M_{\text{э}}x_{\text{д}} + M_{\text{в}}(1 - x_{\text{д}})$ , где  $M_{\text{э}} = 46$ ,  $M_{\text{в}} = 18$  мольные массы этанола и воды.

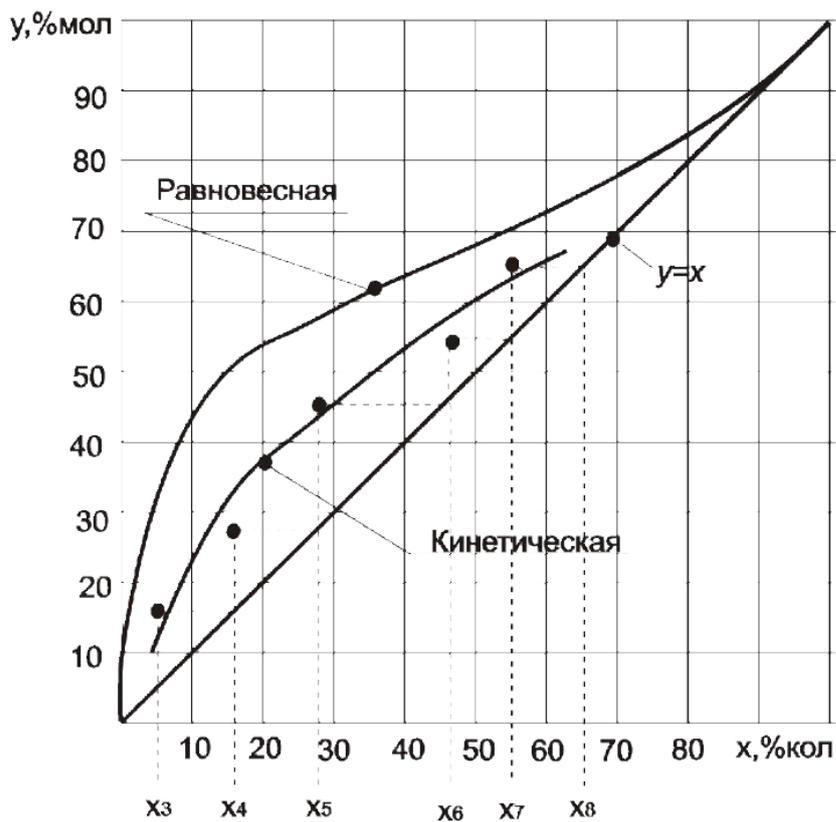


Рисунок 16.4. К построению кинетической кривой при  $R \rightarrow \infty$

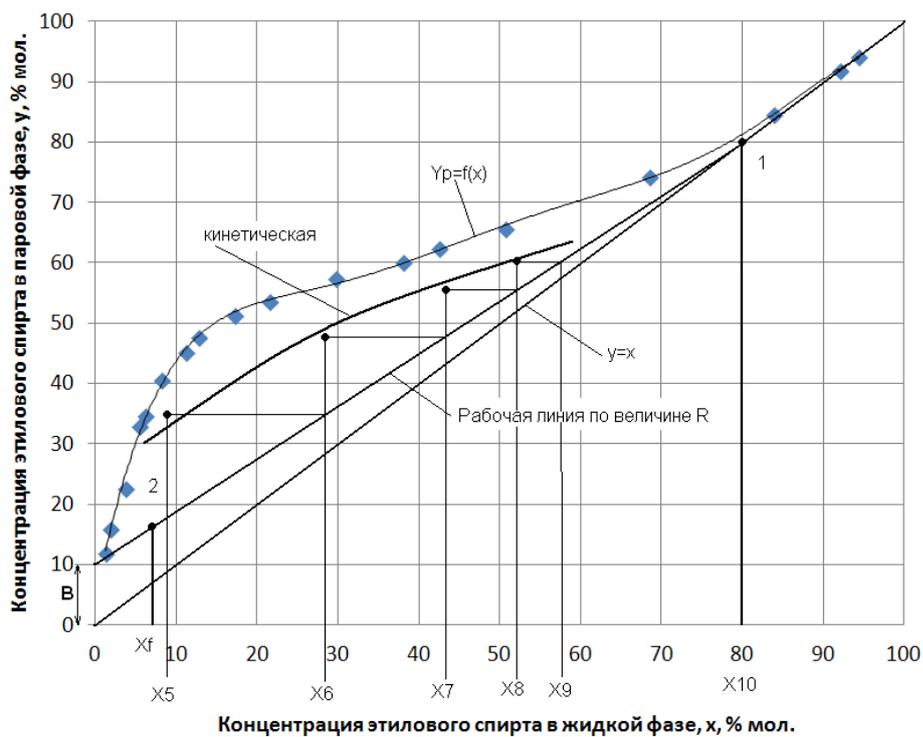


Рисунок 16.5 К построению кинетической кривой при  $R = \text{const}$

## Контрольные вопросы

1. В чем заключается процесс ректификации?
2. Чем обусловлена возможность разделения жидкой смеси на составляющие ее компоненты ректификацией?
3. Что является движущей силой процесса ректификации?
4. Какими параметрами определяется величина потока вещества, переносимого из фазы в фазу?
5. Как устроена тарельчатая колонна?
6. Какие аппараты входят в ректификационную установку непрерывного действия? Каково назначение кипятильника и дефлегматора?
7. Что означает режим работы ректификационной колонны при  $R \rightarrow \infty$ ? Чем отличается этот режим от режима работы ректификационной колонны при конечном значении флегмового числа?
8. Что выражает коэффициент массопередачи?

## Лабораторная работа № 17

### **«Исследование процесса абсорбции диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), водой в насадочной колонне»**

*Цель работы:* изучение процесса физической абсорбции в колонном аппарате.

*Задачи работы:*

1. Экспериментальное определение необходимых параметров.
2. Обработка результатов эксперимента.
3. Выявление влияния параметров процесса на величину коэффициента массопередачи

### Общие положения

Абсорбция газов – поглощение газов или паров из газовых или парогазовых смесей жидкими поглотителями. Этот процесс является избирательным и обратимым, поэтому его используют для разделения газовых или парогазовых смесей, в частности, на нефтеперерабатывающих установках для разделения углеводородсодержащих газов, очистки

отходящих газов или обезвреживания газосбросов и во многих других случаях.

Различают физическую абсорбцию и хемосорбцию.

При физической абсорбции поглощение жидкостью одного из компонентов происходит лишь до тех пор, пока его парциальное давление в газовой смеси выше равновесного над раствором.

При хемосорбции абсорбция поглощаемого компонента сопровождается химической реакцией с жидкостью.

Аппараты, в которых осуществляется процесс абсорбции называют абсорберами, среди которых наиболее распространены аппараты колонного типа – насадочные и тарельчатые.

Основные размеры абсорбера (диаметр и высота) рассчитываются в соответствии с условиями работы: производительности, степени извлечения компонента смеси и т. д., а также данных по статике и кинетике процесса.

Статика процесса абсорбции – это вопросы, связанные с равновесием фаз, которое устанавливается при весьма продолжительном их соприкосновении. Оно определяется термодинамическими свойствами поглощаемого компонента и поглотителя, их составом и зависит от температуры и давления в системе. В случае разбавленных растворов и при низких давлениях в системах газ-жидкость равновесие обычно характеризуют законом Генри:

$$p^* = E \cdot x, \quad (17.1)$$

где  $p^*$  – парциальное давление газа над раствором в условиях равновесия, Па;

$E$  – коэффициент пропорциональности (константа Генри);

$x$  – мольная доля поглощаемого компонента в растворе.

Числовые значения константы Генри для данного газа зависят от природы поглотителя и газа и от температуры, но не зависят от общего давления в системе.

Согласно закону Дальтона, если  $y$  – мольная доля извлекаемого

компонента в газовой смеси и  $P$  – общее давление в системе, то парциальное давление компонента  $P$  можно выразить зависимостью

$$P = P \cdot y \quad (17.2)$$

Если система газ-жидкость находится в равновесии, то парциальное давление компонента смеси рассчитанное по закону Генри должно быть равно парциальному давлению, рассчитанному по закону Дальтона, тогда получим:

$$E \cdot x = P \cdot y \quad (17.3)$$

Откуда 
$$y^* = \frac{E}{P} \cdot x \text{ или} \quad (17.4)$$

$$y^* = m \cdot x, \quad (17.5)$$

где  $m = E / P$  – константа фазового равновесия

Закону Генри подчиняются плохо растворимые газы, т. е. он справедлив и для случая поглощения  $\text{CO}_2$  водой.

В практических расчетах удобно выразить мольные в относительных массовых концентрациях: в жидкой фазе  $\bar{X}$  кг/кг воды, а в газовой фазе  $\bar{Y}$  кг/кг воздуха.

При этом в общем случае уравнение линии равновесия будет не линейным. Однако при небольших содержаниях компонента (при  $y < 0,03$  и  $x < 0,03$ ) равновесную зависимость можно считать линейной и при этом она будет иметь вид:

$$\bar{Y}^* = \bar{m} \cdot \bar{x} \quad (17.6)$$

где  $\bar{m} = \frac{E}{P} \cdot \frac{M_{ж}}{M_{и.г}}$ ,

$M_{ж}$  и  $M_{и.г}$  – молярные массы жидкого поглотителя и инертного газа соответственно, кг /кгмоль.

Кинетика абсорбции, скорость массообмена определяются движущей силой процесса, свойствам поглотителя, компонента и инертного газа, а также жидкодинамическим режимом взаимодействия фаз. Движущую силу процесса можно рассчитать графически, построив равновесную и рабочую

линии в координатах  $\bar{Y} - \bar{X}$ .

Для процессов с содержанием компонента в фазах ниже 5 – 10 % массовые расходы фаз  $\bar{G}$  и  $L$  можно считать неизменными по высоте аппарата, а рабочую линию принять в виде прямой АВ, проведенной через точки концентраций поглощаемого компонента на входе  $(\bar{X}_k; \bar{Y}_H)$  и выходе  $(\bar{X}_H; \bar{Y}_k)$  газа из аппарата.

Движущая сила, выраженная через концентрации компонента в газовой фазе, будет определяться как разность  $\Delta\bar{Y}_H = \bar{Y}_H - \bar{Y}_H^*$  – на входе газа в аппарат и  $\Delta\bar{Y}_k = \bar{Y}_k - \bar{Y}_k^*$  – на выходе, где  $\bar{Y}_H^*, \bar{Y}_k^*$  – концентрации компонента в газовой фазе равновесные с концентрацией компонента в газе на входе в абсорбер и выходе из него, 1 кг компонента на 1 кг инертного газа.

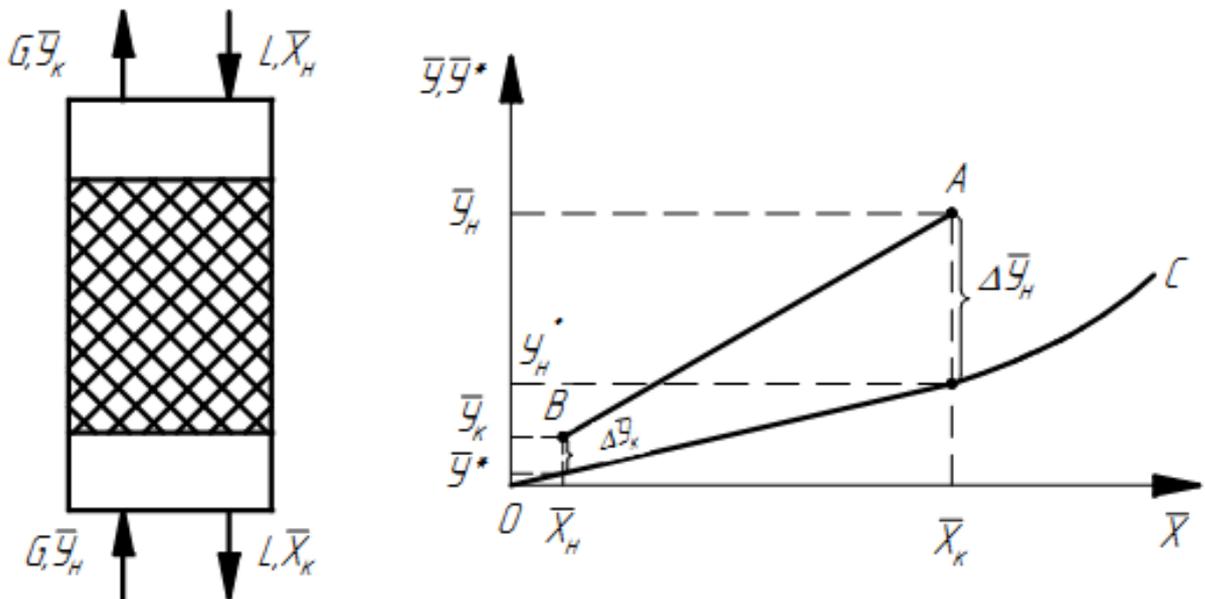


Рисунок 17.1 Схема потоков и концентраций фаз и построение равновесной ОС и рабочей АВ линий

Аналогично можно выразить движущую силу через концентрации того же компонента в жидкой фазе  $\Delta\bar{X}_k = \bar{X}_k^* - \bar{X}_k$ ,  $\Delta\bar{X}_H = \bar{X}_H^* - \bar{X}_H$ .

Значение  $\Delta\bar{Y}$  (равно как и  $\Delta\bar{X}$ ) изменяется по высоте аппарата, поэтому в расчетах если рабочая и равновесная линии прямые, используют средне логарифмическое значение

$$\Delta \bar{Y}_{\text{cp}} = \frac{\Delta \bar{Y}_H - \Delta \bar{Y}_K}{L n \frac{\Delta \bar{Y}_H}{\Delta \bar{Y}_K}} \quad (17.7)$$

или среднеарифметическое

$$\Delta \bar{Y}_{\text{cp}} = \frac{\Delta \bar{Y}_H + \Delta \bar{Y}_K}{2}, \text{ если } \frac{\Delta \bar{Y}_H}{\Delta \bar{Y}_K} \leq 2 \quad (17.8)$$

Как правило, значения  $\bar{Y}_H$ ,  $\bar{Y}_K$ ,  $\bar{X}_H$ , а также массовые расходы газа  $G$  и жидкости  $L$  известны. Значение  $\bar{X}_K$ , а также количество поглощенного компонента  $M$ , можно определить из уравнения материального баланса по поглощаемому компоненту газа:

$$M = \bar{G}(\bar{Y}_H - \bar{Y}_K) = L(\bar{X}_K - \bar{X}_H) \quad (17.9)$$

где  $M$  – количество поглощаемого компонента, перешедшее из газовой фазы в жидкую.

Абсорбер можно рассчитать по основному уравнению массопередачи

$$M = K_y \cdot \Delta \bar{Y}_{\text{cp}} \cdot F \quad (17.10)$$

или 
$$M = K_{\bar{x}} \cdot \Delta \bar{X}_{\text{cp}} \cdot F, \quad (17.11)$$

где  $K_{\bar{y}}$  и  $K_{\bar{x}}$  – поверхностный коэффициент массопередачи, рассчитанный по газовой или жидкой фазам, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$F$  – поверхность контакта фаз, м<sup>2</sup>.

В инженерной практике для абсорберов с непрерывным контактом фаз (насадочных, пленочных) применяют метод расчета по числу единиц переноса и высоты единиц переноса.

Число единиц переноса по физическому смыслу показывает изменение рабочей концентрации на единицу движущей силы и выражается зависимостью газовой фазы

$$m_{\bar{y}} = \frac{\bar{Y}_H - \bar{Y}_K}{\Delta \bar{Y}_{\text{cp}}} \quad (17.12)$$

для жидкой фазы

$$m_{\bar{x}} = \frac{\bar{X}_K - \bar{X}_H}{\Delta \bar{X}_{\text{cp}}} \quad (17.13)$$

Высота единицы переноса массы или высота зоны контакта, эквивалентная одной единице переноса массы, определяется из выражений:  
для газовой фазы

$$h_{\bar{y}} = \frac{G}{K_{\bar{y}} \cdot S_{\sigma}} \quad (17.14)$$

$$h_{\bar{x}} = \frac{L}{K_{\bar{x}} \cdot S_{\sigma}} \quad (17.15)$$

где  $S$  – площадь сечения аппарата,  $\text{м}^2$ .

Зная число единиц переноса и высоту единицы переноса, можно найти высоту рабочей зоны абсорбера.

$$H = h_{\bar{y}} \cdot m_{\bar{y}} \text{ или } H = h_{\bar{x}} \cdot m_{\bar{x}} \quad (17.16)$$

#### Описание установки

Лабораторная работа проводится на комплексной установке для исследования гидродинамических и массообменных процессов в колонных аппаратах-на насадочном аппарате с кольцами  $25 \times 25 \times 3$  мм. Схема представлена на рисунке 17.2.

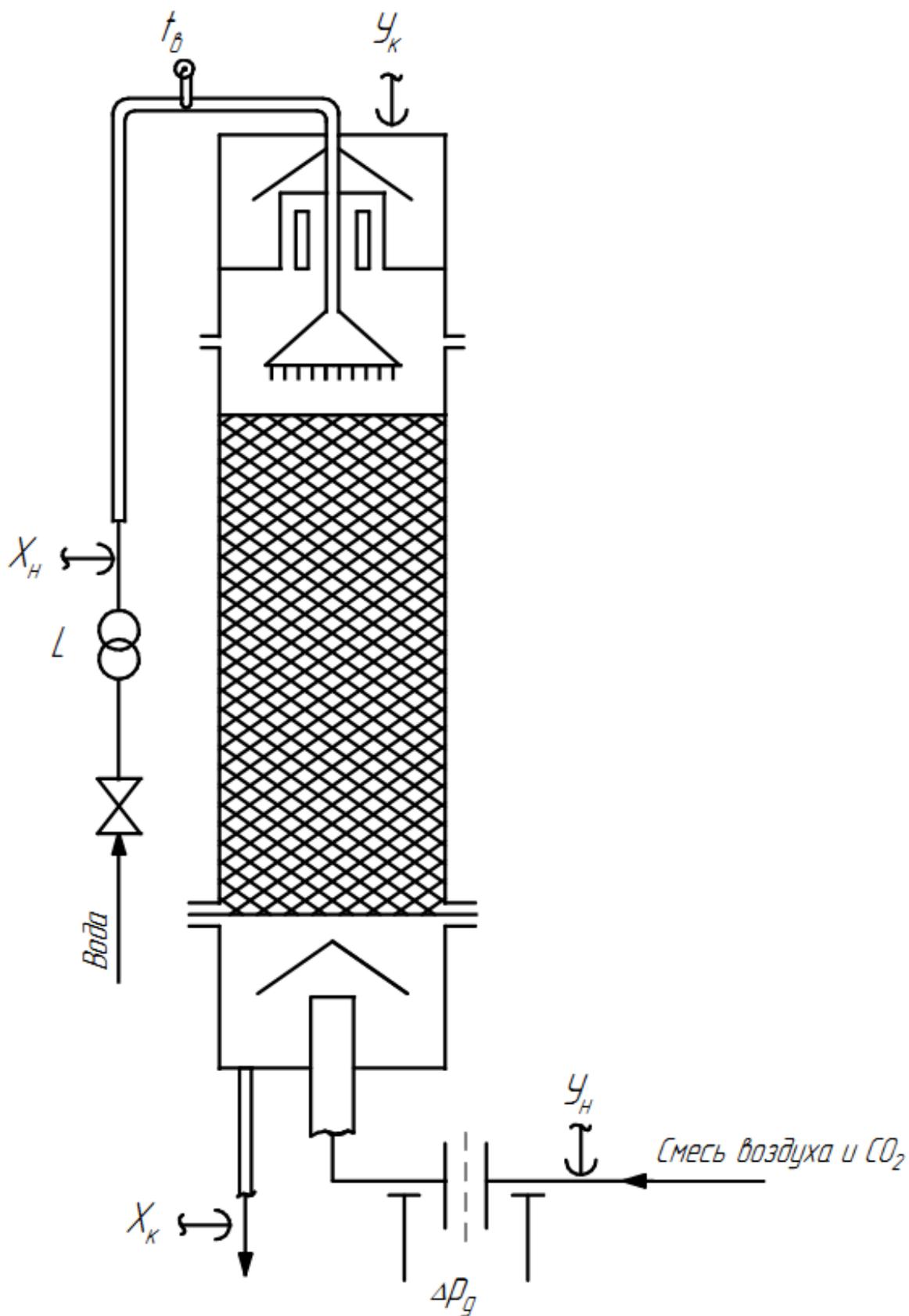


Рисунок 17.2 Схема экспериментальной установки

Диаметр абсорбера 200 мм, высота насадки 105 см.

Температура воды на орошение абсорбера измеряется термометром

сопротивления типа TCM50, вторичный прибор – ТРМ200.

Объемная концентрация CO<sub>2</sub> в воздушной смеси на входе и выходе абсорбера, замеряется сенсорными датчиками типа EE 870, вторичный прибор – ТРМ 200.

Установка снабжена газовым баллоном с CO<sub>2</sub>, редуктором понижения давления воздуходувкой и измерительной диафрагмой, по перепаду давления на которой определяется расход воздуха.

Расход воды определяется с помощью ультразвукового расходомера KAMSTRUP с импульсивным выходом (300 имп. /литр), вторичный прибор счетчик СИ8.

#### Порядок выполнения работы

1. Включить установку переключателем на щите управления.
2. Переключатель «Лабораторная работа» поставить в положение «абсорбция». На щите управления засветятся светодиодные индикаторы только тех приборов, которые отображают параметры, замеряемые для данной лабораторной работы.
3. Ступенчатым регулятором расхода воздуха установить начальный расход воздуха (положение ручки – 9÷11 деление)
4. Вентилем регулирования подачи воды устанавливают по прибору расход воды 300÷350 л/час.
5. После выхода колонны на режим открывают вентиль на баллоне с CO<sub>2</sub> и редукционным вентилем редуктора устанавливают расход CO<sub>2</sub>, чтобы его концентрация в воздухе составляла до 3 % объемных (по показаниям прибора «концентрация CO<sub>2</sub>» на входе).
6. После выхода процесса на стационарный режим (4÷5 мин., стабилизация показаний вторичных приборов концентрации CO<sub>2</sub> на входе и выходе абсорбера) фиксируют показания и вносят их в таблицу 17.1.

Таблица 17.1 – Экспериментальные данные

№ п/п	Перепад давления на	Объемный расход воздуха V,	Объемный расход воды V <sub>в</sub>	Объемная концентрация CO <sub>2</sub> в воздухе, % объем. (%)	Температура воды
-------	---------------------	----------------------------	-------------------------------------	---	------------------

	диафрагме $\Delta P_g$ , Па	м <sup>3</sup> /час	л/час	мол.)		$t_b, ^\circ\text{C}$
				на входе $Y_n$	на выходе $Y_k$	
1						
2						
3						

$P_{\text{баром.}} =$  \_\_\_\_\_ мм. рт. ст.

7. Далее увеличивают объемный расход воздуха ступенчатым переключателем (2 щелчка), после выхода процесса на стационарный режим (4÷5 мин., наблюдая стабилизацию показаний вторичных приборов отображающих концентрацию  $\text{CO}_2$ ) также фиксируют показания и вносят их в таблицу 17.1.

8. Аналогично в третьем режиме увеличивают расход воздуха (2 щелчка переключателем), стационарный режим и фиксация показаний.

#### Обработка результатов измерений

1. Для всех режимов пересчитать объемные концентрации (объемные доли)  $\text{CO}_2$ ,  $y_n$  и  $y_k$  в относительные массовые доли по соотношению:

$$\bar{Y} = \frac{44y}{29(1-y)}, \text{ кг } \text{CO}_2/\text{кг воздуха} \quad (17.17)$$

При этом следует иметь в виду, что мольные (молярные) доли численно равны объемным, что следует из закона Авогадро, в соответствии с которым при одинаковых термодинамических условиях объем моля любого газа есть величина постоянная (22,4 л/моль).

Результаты расчетов занести в таблицу 17.2.

Таблица 17.2 – Расчетные данные

№ п/п	Массовый расход воздуха G, кг/с	Массовый расход воды L, кг/с	Относительные массовые доли концентрации, движущая сила кг $\text{CO}_2$ /кг воздуха						
			$\bar{Y}_n$	$\bar{Y}_k$	$\bar{X}_k$	$\bar{Y}_n^*$	$\Delta\bar{Y}_n$	$\Delta\bar{Y}_k$	$\Delta\bar{Y}_{\text{ср}}$
1									
2									
3									

№ п/п	Масса поглощаемого CO <sub>2</sub> , кг/с	Плотность орошения Г, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> с	Степень поглощения CO <sub>2</sub> η	Скорость воздуха ω, м/с	Коэффициент массопередачи $K\bar{y}$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{с}}$	Число единиц переноса массы $M\bar{y}$	Высота переноса массы $h\bar{y}$ , м
1							
2							
3							

## 2. Массовый расход воздуха

$$G = V \cdot \rho_{\text{возд}} \quad (17.18)$$

$V$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с;

$\rho_{\text{возд.}}$  – плотность воздуха при температуре  $T$  опыта, кг/м<sup>3</sup>

$$[\rho_{\text{возд.}} = \rho_0 T_0 P / TP_0];$$

$$\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3 \text{ при } T_0 = 273\text{К};$$

$P$  – давление в абсорбере;

$P_0$  – атмосферное давление.

Тарировочная зависимость расхода воздуха от перепада давления на измерительной диафрагме  $\Delta P_g$  имеет вид:  $V = \frac{2,8\sqrt{\Delta P_g}}{3600}$ , м<sup>3</sup>/с.

3. Массовый расход воды  $L$  (кг/с), определяется по объемному расходу при температуре воды  $t_b$ :  $L = \frac{V_b \cdot \rho_b}{1000 \cdot 3600}$ , (кг/с),

где  $\rho_b$  – плотность воды при температуре  $t_b$ ;

$V_b$  – расход воды, л/час.

4. Площадь поверхности насадки, принимают равной поверхности межфазного контакта  $F$ :

$$F = 0,785D^2 \cdot H \cdot \sigma \quad (17.19)$$

где  $D$  – диаметр абсорбера, м;

$H$  – высота насадки, м;

$\sigma$  – удельная поверхность насадки, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>; (для керамических колец размером 15×15×2 мм  $\sigma = 330 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ).

5. Для расчета средней движущей силы процесса в координатах  $\bar{Y}-\bar{X}$  строят равновесную линию процесса абсорбции водой по формулам (17.6), (17.7) и линию рабочую (рисунок 17.1). Для этого необходимо знать равновесные концентрации  $\bar{Y}_H^*$  и  $\bar{Y}_K^*$ . В данной работе на орошение подают чистую воду, следовательно,  $\bar{X}_H = 0$  и  $\bar{Y}_K^* = 0$ .

Значение  $\bar{X}_K$  определяют из уравнения материального баланса (17.10):

$$\bar{X}_K = \frac{G(\bar{Y}_H - \bar{Y}_K)}{L}, \text{ кг CO}_2/\text{кг H}_2\text{O}. \quad (17.20)$$

С помощью уравнения равновесия (6) и (7) рассчитывают  $\bar{Y}_H^*$  и  $\bar{Y}_K^*$ .

Численное значение константы Генри определяют из справочных данных в зависимости от температуры  $t_B$ .

Общее давление  $\underline{P} = \underline{P}_{\text{баром.}} \cdot 133,3$ , Па.

$M_{\text{ж}} = 18$  – молярная масса воды, кг /кгмоль.

$M_{\text{и.г}} = 29$  – средняя молярная масса воздуха, кг /кгмоль.

Далее определяют  $\Delta\bar{Y}_H = \bar{Y}_H - \bar{Y}_H^*$ ,  $\Delta\bar{Y}_K = \bar{Y}_K - \bar{Y}_K^*$  и  $\Delta\bar{Y}_{\text{cp}}$  по выражению (8) или (9), а также число единиц переноса массы  $M_{\bar{y}}$  и высоту эквивалентную единице переноса массы  $h_{\bar{y}}$  (по выражениям (17.12) и (17.14).

6. По уравнению материального баланса (17.9) определяют массу диоксида углерода, поглощаемого в единицу времени (кг/с):

$$M = G \cdot (\bar{Y}_H - \bar{Y}_K) \quad (17.20)$$

7. Определяют коэффициент массопередачи, соответствующий заданному режиму работы установки, кг/м<sup>2</sup>с:

$$K_{\bar{y}} = \frac{M}{F \cdot \Delta\bar{Y}_{\text{cp}}} \quad (17.21)$$

8. Среднюю скорость воздуха (м/с) рассчитывают по уравнению расхода (на полное сечение абсорбера)

$$\omega = \frac{V}{0,785D^2} \quad (17.22)$$

9. Плотность орошения (м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>с) насадки водой:

$$\Gamma = \frac{V_B}{0,785D^2} \quad (17.23)$$

10. Степень поглощения CO<sub>2</sub>:

$$\eta = \frac{\bar{Y}_H - \bar{Y}_K}{\bar{Y}_H} \quad (17.24)$$

11. Результаты расчетов заносят в отчетную таблицу 17.2.

12. Построить график зависимости  $K_{\bar{y}} = f(\omega)$ .

#### Контрольные вопросы

1. В чем заключается физическая сущность процесса абсорбции?
2. Как влияют параметры процесса (температура, давление, конкурирующие примеси) на равновесие в исследуемой системе?
3. Что является движущей силой в процессе абсорбции?
4. Как рассчитывается средняя движущая сила массообменного процесса абсорбции?
5. С помощью какого уравнения определяется количество поглощенного диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) водой?
6. Какие режимы работы насадочных аппаратов наблюдаются при взаимодействии газовой (паровой) и жидкой фаз, при осуществлении массообменных процессов?

#### Лабораторная работа № 18

##### «Исследование процесса адсорбции в неподвижном слое адсорбента»

*Цель работы:* ознакомление с адсорбционно-десорбционной установкой периодического действия с неподвижным слоем адсорбента.

*Задачи работы:*

1. Экспериментальное определение необходимых параметров.
2. Обработка результатов эксперимента.

#### Общие положения

Адсорбция – процесс избирательного поглощения одного или нескольких компонентов из смеси газов, паров или растворенных веществ в жидкости поверхностью твердого пористого тела.

Газовую или жидкую фазу, в которой находится удаляемый компонент, называют носителем; поглощаемое вещество, находящееся вне пор адсорбента (твердое тело, на поверхности и в порах которого происходит концентрирование поглощаемого вещества), называют адсорбтивом, а после его перехода в поры – адсорбатом.

В качестве адсорбентов применяют пористые зернистые материалы, имеющие удельную поверхность пор до 1500 м<sup>2</sup>/г. К их числу относятся активированные угли, силикагели и молекулярные сита (цеолиты), ионообменные смолы.

Наиболее важная задача адсорбции – селективное поглощение компонентов из газов и жидкостей. Так активированные угли используются для полярных молекул, например, молекул воды.

Сила притяжения со стороны адсорбента могут быть двух типов, обуславливающих либо физическую адсорбцию, либо химическую адсорбцию (хемосорбцию).

Физическая адсорбция обуславливается действием ван-дер-ваальсовых сил и является обратимым процессом в отличие от хемосорбции, связанной с химическим превращением на поверхности адсорбента.

Обратимость физической адсорбции дает возможность проводить последовательно процессы адсорбции и десорбции. Не меньшую роль играет также селективность – избирательная способность адсорбентов по-разному поглощать компоненты смеси, обусловленная физическим строением адсорбента и природой адсорбционных сил. Как правило, вещество поглощается тем легче, чем больше его молярная масса, чем выше его критическая температура.

Важной характеристикой процесса является изотерма адсорбции, показывающая зависимость равновесного количества адсорбированного вещества  $a$  в адсорбенте от его концентрации  $X$  или парциального давления  $P$  в парогазовой смеси при постоянной температуре.

Величина статической активности адсорбента  $a$  зависит от того, какое

вещество поглощает, т.е. от природы вещества; какое вещество поглощается, т.е. от природы адсорбтива; концентрации поглощаемого вещества  $X$  в парогазовой (жидкой) фазе; от температуры – с повышением температуры равновесная концентрация уменьшается; от давления – с ростом давления равновесная концентрация увеличивается; наличия примесей в парогазовой фазе, поглощаемых этим адсорбентом.

Изотермы адсорбции описывают в общем виде равновесие между твердой и газовой фазами. Вид этих изотерм может быть самым различным (рисунок 18.1).

Определяют их, как правило, экспериментально.



Рисунок 18.1 – Изотермы адсорбции

При адсорбции поглощаемое вещество переходит в поры адсорбента, что является аналогом процесса конденсации – переход вещества из пара в жидкое состояние. При конденсации происходит выделение теплоты. Выделяется она и при адсорбции, т.е. процесс адсорбции экзотермический.

В промышленности применяют адсорбционные процессы, протекающие в неподвижном слое адсорбента, движущемся и псевдооживленном слоях адсорбента.

В работе изучают процесс адсорбции паров воды из воздуха цеолитом СаА в неподвижном слое адсорбента.

Изотермы адсорбции, полученные экспериментально для паров воды из

воздуха цеолитом СаА при различных температурах приведены на рисунок 18.2. В области малых парциальных давлений изотермы адсорбции имеют резко выпуклый характер при относительно низких температурах (25 – 50 °С).

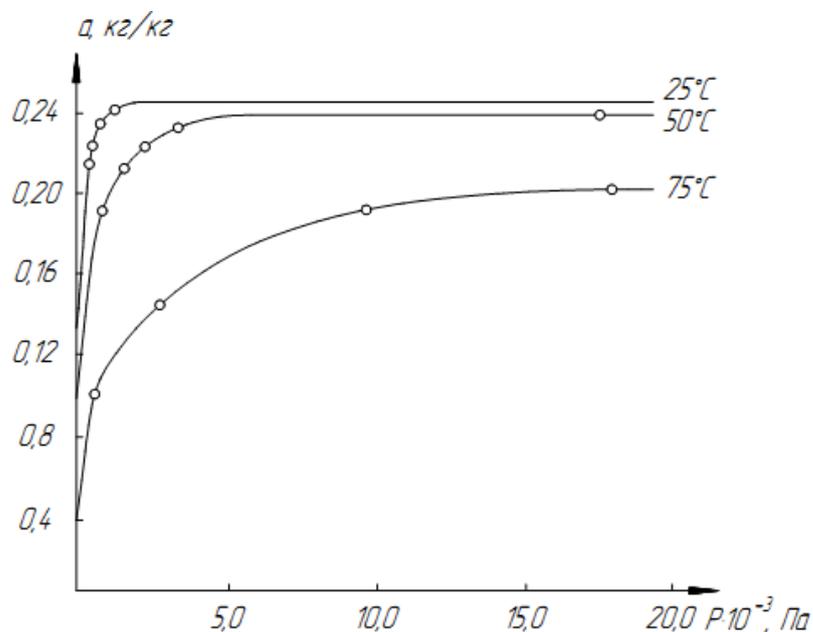


Рисунок 18.2 – Изотермы адсорбции паров воды цеолитами СаА

В таких случаях расчет адсорбера по числу ступеней контакта является ненадежным и процесс рассчитывается по уравнению массопередачи:

$$M = K_V \cdot V_{\text{ц}} \cdot \Delta X_{\text{ср}}, \quad (18.1)$$

где  $M$  – количество поглощенной цеолитом влаги, кг/с;

$K_V$  – объемный коэффициент массопередачи, кг/м<sup>3</sup>·с;

$V_{\text{ц}}$  – объем цеолита в адсорбере, м<sup>3</sup>;

$\Delta X_{\text{ср}}$  – средняя движущая сила процесса, выраженная через концентрации паров воды в воздухе:

$$\Delta X_{\text{ср}} = \frac{\Delta X_{\text{вх}} - \Delta X_{\text{вых}}}{\ln \frac{\Delta X_{\text{вх}}}{\Delta X_{\text{вых}}}}, \quad (18.2)$$

где  $\Delta X_{\text{вх}} = \Delta X_{\text{вх}} - X_{\text{вх}}^*$  – движущая сила на входе в адсорбер;

$\Delta X_{\text{вых}} = \Delta X_{\text{вых}} - X_{\text{вых}}^*$  – движущая сила на выходе из адсорбера ( $X_{\text{вх}}$  и  $X_{\text{вых}}$  – концентрации (влажностенержания) паров воды в воздухе на входе и выходе из адсорбера, кг влаги / кг сух. возд);

$X_{\text{вх}}^*$  и  $X_{\text{вых}}^*$  – концентрации паров воды в воздухе, равновесные с концентрациями их в адсорбенте на входе и выходе из адсорбера, кг влаги / кг сух. возд.

Как следует из изотерм адсорбции цеолита СаА (рис.2),  $X_{\text{вх}} \gg X_{\text{вх}}^*$  и  $X_{\text{вых}} \gg X_{\text{вых}}^*$ , то можно принять:

$$\Delta X_{\text{ср}} \approx \frac{X_{\text{вх}} - X_{\text{вых}}}{\ln \frac{X_{\text{вх}}}{X_{\text{вых}}}}, \quad (18.3)$$

Равновесные концентрации  $X_{\text{вх}}^*$  и  $X_{\text{вых}}^*$  находят по изотерме адсорбции в соответствии со значениями величин адсорбции начальной  $a_{\text{н}}$  и  $a_{\text{к}}$ .

Примечание. В процессе адсорбции поверхность контакта фаз определить трудно, коэффициент массопередачи относят к объёму адсорбента в адсорбере и называют его объёмным коэффициентом массопередачи.

#### Описание установки

Схема лабораторной установки приведена на рисунке 18.3. Установка состоит из колонных аппаратов: 1 – адсорбер-десорбер-охладитель; 2 – тарельчатый увлажнитель воздуха. Аппараты изготовлены из стеклянных царг диаметром 150 мм. Вспомогательное оборудование установки обеспечивает проведение всех трех циклов работы периодически действующей установки.

Адсорбция. Воздух подается вентиляторной воздуходувкой 3 через открытый электроклапан ЭКГ2 в увлажнитель 2, по выходе из которого он имеет относительную влажность  $\varphi = 50 \div 70 \%$ .

Далее, пройдя обратный клапан ОК и десорбционный нагреватель 4, поступает на вход адсорбера 1, в котором молекулы воды поглощаются из воздуха адсорбентом.

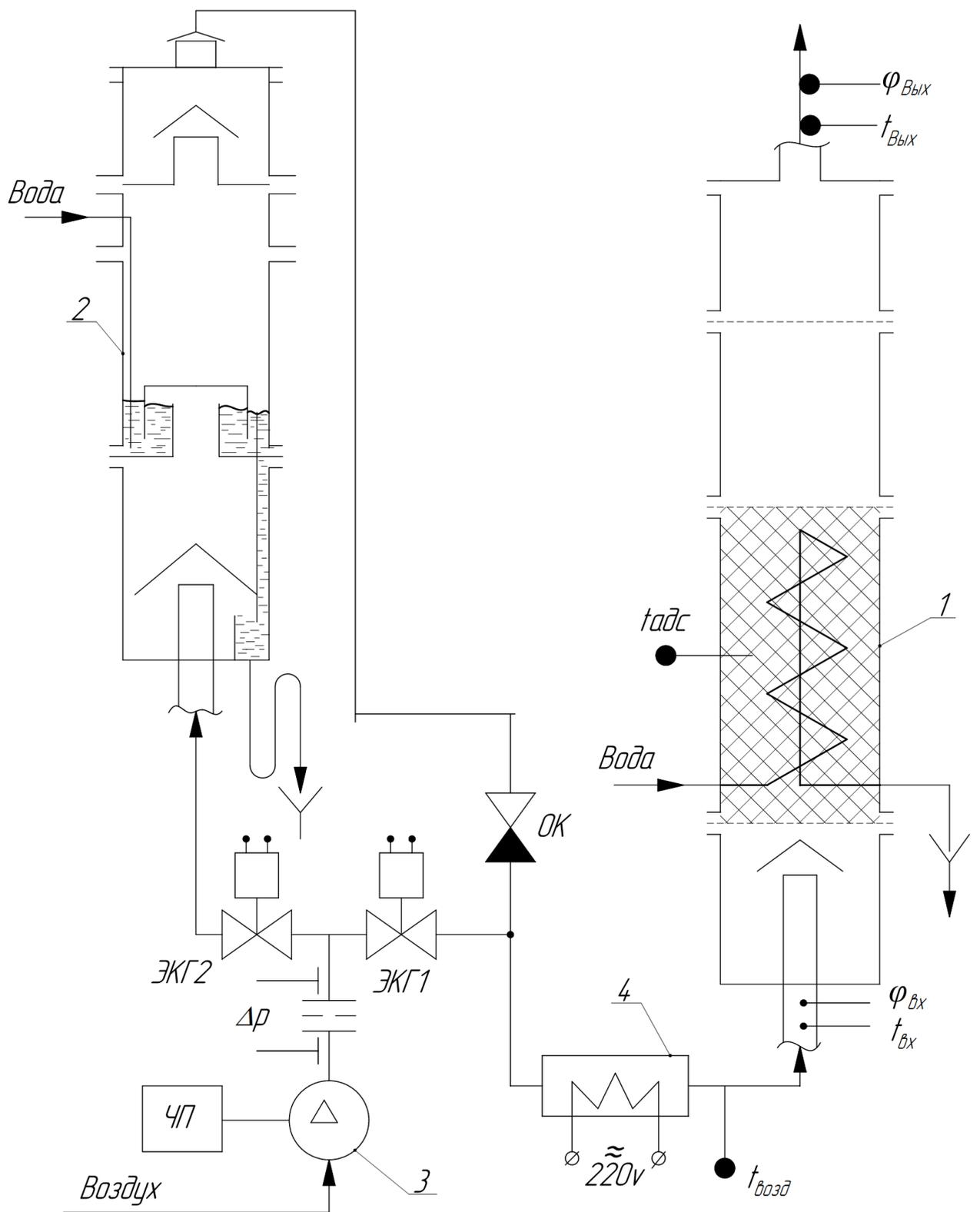


Рисунок 18.3 – Схема установки

Количество вещества  $M$ , перешедшего из одной фазы в другую рассчитывают по уравнению материального баланса:

$$\begin{aligned}
 M &= G_{с.в} (X_{вх} - X_{вых}) = \\
 &= L(a_k - a_n),
 \end{aligned}
 \tag{18.4}$$

где  $M$  – количество влаги, поглощенной из воздуха цеолитом, кг/с;

$G_{с.в.}$  – расход сухого воздуха, прошедшего через адсорбер, кг/с;

$L$  – количество адсорбента в адсорбере, кг.

Десорбция. Этот процесс регенерации адсорбента осуществляется нагретым воздухом ( $120^{\circ}\text{C}$ ). В этом цикле воздух через открытый электроклапан ЭКГ1 (электроклапан ЭКГ2 – закрыт) поступает в воздушнонагреватель 4, где нагревается до температуры регенерации и подается на вход адсорбера-десорбера 1. Пройдя слой адсорбента воздух совместно с десорбированной влагой удаляется из аппарата.

Охлаждение адсорбента. После завершения цикла десорбции охлаждение адсорбента осуществляется водой, подаваемой во внутренний змеевик адсорбера, а также за счёт потерь тепла в окружающую среду.

Расход воздуха на установке регулируется изменением числа оборотов электродвигателя воздуходувки с помощью частотного преобразователя Ч.П.

Объёмная ёмкость адсорбера составляет  $0,0044 \text{ м}^3$  (4,4 л.).

#### Порядок выполнения работы

Перед пуском установки следует ознакомиться с содержанием работы и установкой. Далее:

1. Включить установку с помощью переключателя на передней панели щита управления и КИП.
2. Переключателем выбора лабораторной работы выбрать положение «Адсорбция», наблюдать исправную работу вторичных приборов измеряющих параметры данного цикла.
3. Вентилем подачи воды на увлажнитель установить расход воды 60 – 70 л/час.
4. Потенциометром «Расход воздуха» по вторичному прибору «Перепад давления на диафрагме» установить начальный расход воздуха соответствующий перепаду давления на диафрагме  $\approx 200$  Па. Наблюдать барботажные слои на колпачковых тарелках увлажнительной колонны.

5. Через 4 – 5 минут занести показания замера входных и выходных параметров адсорбера в таблицу 18.1.

6. Регулятором «Расход воздуха» увеличить перепад давления на диафрагме на 100 – 150 Па.

7. Через 4 – 5 минут занести показания замера входных и выходных параметров адсорбера в табл. 1.

8. Аналогично, увеличивая расход воздуха, выполняют еще 2 – 3 замера и заносят результаты в таблицу 18.1.

Таблица 1 – Измеренные данные

№ п/п	Перепад давления на диафрагме $\Delta p$ , Па	Параметры воздуха				Температура адсорбента $t_{адс.}$ , °C
		$t_{вх.}$ , °C	$\varphi_{вх.}$ , %	$t_{вых.}$ , °C	$\varphi_{вых.}$ , %	
1						
2						
3						
4						

Барометрическое давление  $B =$  \_\_\_\_\_ мм рт.ст.

Примечание. Барометрическое давление  $B$  определяется по электронному барометру.

9. По завершению процесса адсорбции установку с помощью переключателя переводят в режим десорбции-регенерации адсорбента.

10. Включают кнопочным пускателем «Нагрев воздуха» систему регулирования температуры воздуха для десорбирования адсорбента ( $\approx 110^\circ\text{C}$ ).

11. Расход воздуха при этом устанавливают по перепаду давления на измерительной диафрагме  $\approx 200$  Па.

12. Наблюдать за течением процесса регенерации адсорбента по входным и выходным параметрам воздуха.

13. По завершении процесса регенерации установку с помощью переключателя переводят в режим охлаждения адсорбера.

14. Вентилем регулирования расхода воды подают охлаждающую воду во внутренний змеевик адсорбера-десорбера ( $\approx 80$  л/час по прибору «Расход воды»).

#### Обработка результатов измерений

1. Объёмный расход влажного воздуха определяют по перепаду давления на измерительной диафрагме по татировочному уравнению

$$V = 2,8\sqrt{\Delta p} \quad \text{м}^3/\text{час} \quad (18.5)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления на диафрагме, Па.

2. По заданному объёмному расходу влажного воздуха определяют массовый расход сухого воздуха ( $G_{\text{с.в.}}$ , кг/час):

$$G_{\text{с.в.}} = \frac{(B - \varphi \cdot p_{\text{нас}})V \cdot M_{\text{возд}}}{RT} \quad (18.6)$$

где  $\varphi$  – относительная влажность воздуха,  $\frac{\%}{100}$ ;

$p_{\text{нас}}$  – давление насыщенного пара при данной температуре, Па (определяется по таблице давления насыщенного пара);

$M_{\text{возд}}$  – молярная масса воздуха,  $M_{\text{возд}} = 29$  кг/моль;

$B$  – барометрическое давление, Па (1 мм рт.ст. = 133,3 Па);

$R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8314 Дж/(кмоль·К);

$T$  – температура, К ( $K = t^{\circ}\text{C} + 273$ ).

3. Определение влагосодержания воздуха,  $X$  (кг влаги / кг сух. возд) определяют по уравнению:

$$X = 0,622 \frac{\varphi \cdot p_{\text{нас}}}{B - \varphi \cdot p_{\text{нас}}} \quad (18.7)$$

4. По уравнению (18.7) для каждого проведенного эксперимента определяются  $X_{\text{вх}}$  и  $X_{\text{вых}}$ . Результаты заносятся в таблицу 18.2.

5. По уравнению (18.4) рассчитывают количество влаги, поглощенной из воздуха:

$$W = \frac{G_{\text{с.в.}}(X_{\text{вх}} - X_{\text{вых}})}{3600} \quad (18.8)$$

6. Среднюю движущую силу  $\Delta X_{\text{ср}}$  определяют по уравнению (18.3).

Результаты расчетов по пунктам 5 и 6 заносят в таблицу 18.2

7. Используя основное уравнение массопередачи (18.1) определяют объёмный коэффициент массопередачи  $K_V$ :

$$K_V = \frac{M}{V_{\text{ц}} \cdot \Delta X_{\text{ср}}} \quad , \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}} \frac{\frac{\text{кг}_{\text{вл.в}}}{\text{кг}_{\text{сух.в}}}}{\text{кг}_{\text{сух.в}}} \quad (18.9)$$

где  $V_{\text{ц}} = 0,0044 \text{ м}^3$  – объём абсорбента.

8. По результатам расчётов построить график зависимости  $K_V = \varphi(\omega)$ .

#### Контрольные вопросы

1. Дайте определения: адсорбент, адсорбтив, адсорбат.
2. Назовите факторы, влияющие на равновесные соотношения при адсорбции.
3. Что такое динамическая и статическая активность адсорбента?
6. Почему в адсорбере воздух отдаёт водяной пар адсорбенту, а в десорбере – получает его от него?

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – М.: Химия, 1968.
- 2 Баранов Д.А. Процессы и аппараты: Учебник для студ. Проф. Образования. – М.: Изд. Центр «Академия», 2004.
- 3 Владимиров А.И., Щелкунов В.А., Круглов С.А. Основные процессы и аппараты нефтегазопереработки: Учеб. Пособие для вузов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002.
- 4 Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Г. Основы техники псевдоожижения. – М.: Химия, 1967.
- 5 Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 2002.
- 6 Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973.
- 7 Лаптев А.Г., Минеев Н.Г. Разделение жидких и газовых гомогенных смесей в тарельчатых и насадочных аппаратах. Учебное пособие по курсам. – Казань: КГЭУ, 2005.
- 8 Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987.
- 9 Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. – М.: Химия, 1987.
- 10 Скобло А.И., Трегубова И.А., Молоканов Ю.К. Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. – М.: Химия, 2000.
- 11 Сугак А., В.К. Леонтьев, В.В.Туркин. Процессы и аппараты химической технологии: Учеб. Пособие для нач. проф. Образования. – М.: Издательский центр Академия», 2005.

## СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от температуры.

Температура, °С	Давление (абсолютное), ат	Удельный объем, м <sup>3</sup> /кг	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная энтальпия жидкости $r$ , кДж/кг	Удельная энтальпия пара $r''$ , кДж/кг	Удельная теплота парообразования $r$ , кДж/кг
80	0,483	3,414	0,2929	335,2	2644	2310
85	0,590	2,832	0,3531	356,2	2653	2297
90	0,715	2,365	0,4229	377,1	2662	2285
95	0,862	1,985	0,5039	398,1	2671	2273
100	1,033	1,675	0,5970	419,0	2679	2260
105	1,232	1,421	0,7036	440,4	2687	2248
110	1,461	1,212	0,8254	461,3	2696	2234
115	1,724	1,038	0,9635	482,7	2704	2221
120	2,025	0,893	1,1199	504,1	2711	2207

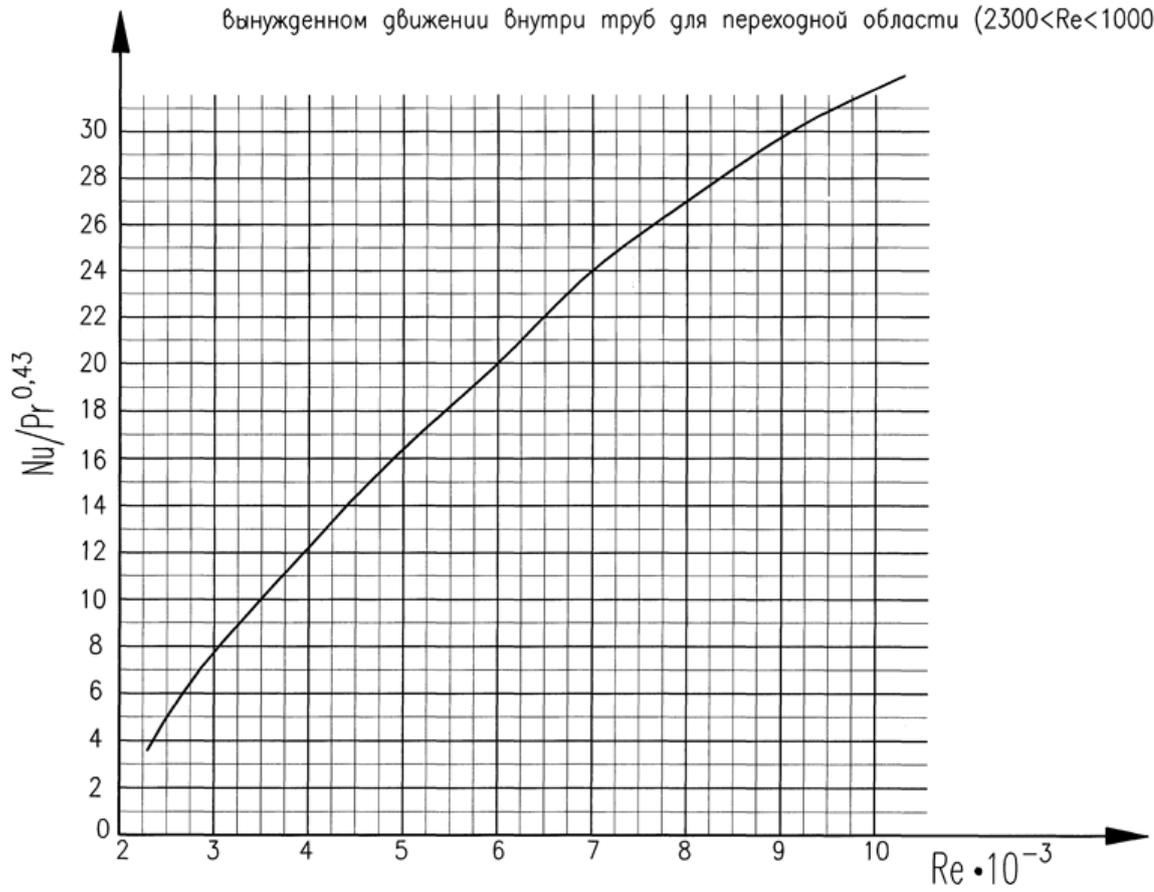
Физические свойства воды (на линии насыщения)

$p$ , ат	$t$ , °С	$\rho$ , $\frac{кг}{м^3}$	$i$ , $\frac{кДж}{кг}$	$c_p$ , $\frac{кДж}{кг \cdot К}$	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/м·К	$\alpha \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , К <sup>-1</sup>	$\sigma \cdot 10^4$ , кг/с <sup>2</sup>	Pr
1	0	1000	0	4,23	55,1	1,31	1790	1,79	-0,63	756	13,7
1	10	1000	41,9	4,19	57,5	1,37	1310	1,31	0,70	762	9,52
1	20	998	83,8	4,19	59,9	1,43	1000	1,01	1,32	727	7,02
1	30	996	126	4,18	61,8	1,49	804	0,81	3,21	712	5,42
1	40	992	168	4,18	63,4	1,53	657	0,66	3,87	697	4,31
1	50	988	210	4,18	64,8	1,57	549	0,556	4,49	677	3,54
1	60	983	251	4,18	65,9	1,61	470	0,478	5,11	662	2,98
1	70	978	293	4,19	66,8	1,63	406	0,415	5,70	643	2,55
1	80	972	335	4,19	67,5	1,66	355	0,365	6,32	626	2,21
1	90	965	377	4,19	68,0	1,68	315	0,326	6,95	607	1,95
1,03	100	958	419	4,23	68,3	1,69	282	0,295	7,5	589	1,75
1,46	110	951	461	4,23	68,5	1,69	256	0,268	8,0	569	1,58
2,02	120	943	503	4,23	68,6	1,72	231	0,244	8,6	549	1,43

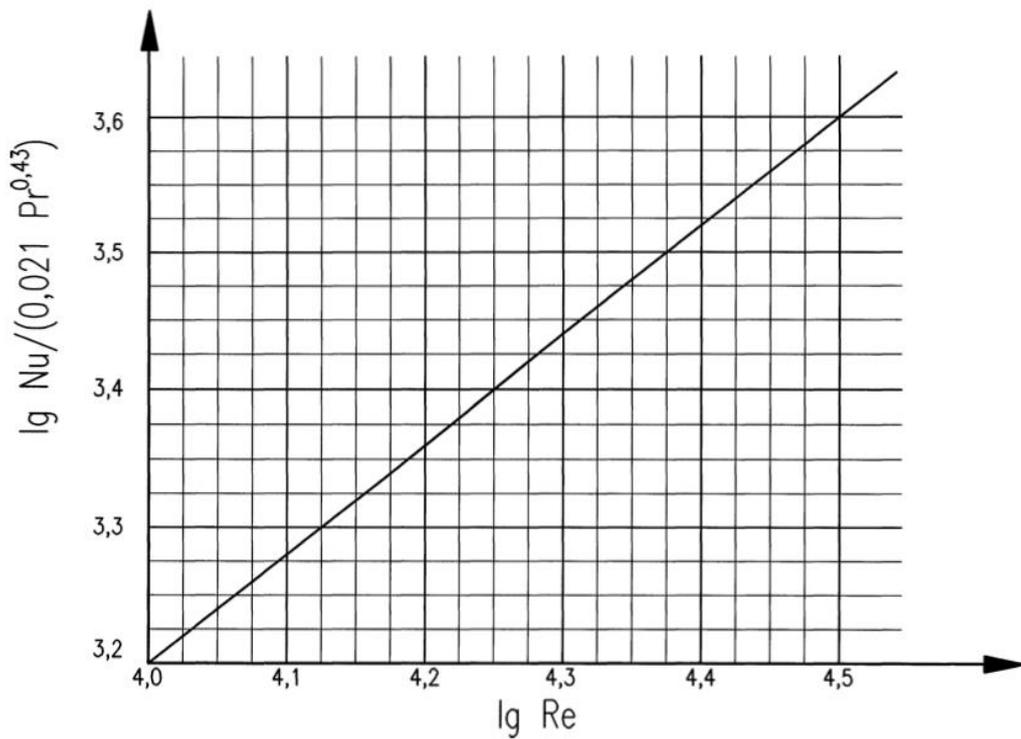
Физические параметры сухого воздуха при нормальном давлении

$t$ , °С	$c_p$ , $\frac{кДж}{кг \cdot К}$	$\rho$ , $\frac{кг}{м^3}$	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/м·К	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
10	1,005	1,247	2,51	20,06	14016	0,705
20	1,005	1,205	2,59	21,42	15,06	0,703
30	1,005	1,165	2,67	22,54	16,00	0,701
40	1,005	1,128	2,75	24,26	16,96	0,699
50	1,005	1,093	2,82	25,72	17,95	0,698
60	1,005	1,060	2,89	27,26	18,97	0,696
70	1,009	1,029	2,96	28,85	20,02	0,694
80	1,009	1,000	3,04	30,48	21,09	0,692
90	1,009	0,972	3,12	32,03	22,10	0,690
100	1,009	0,946	3,20	33,62	23,13	0,688

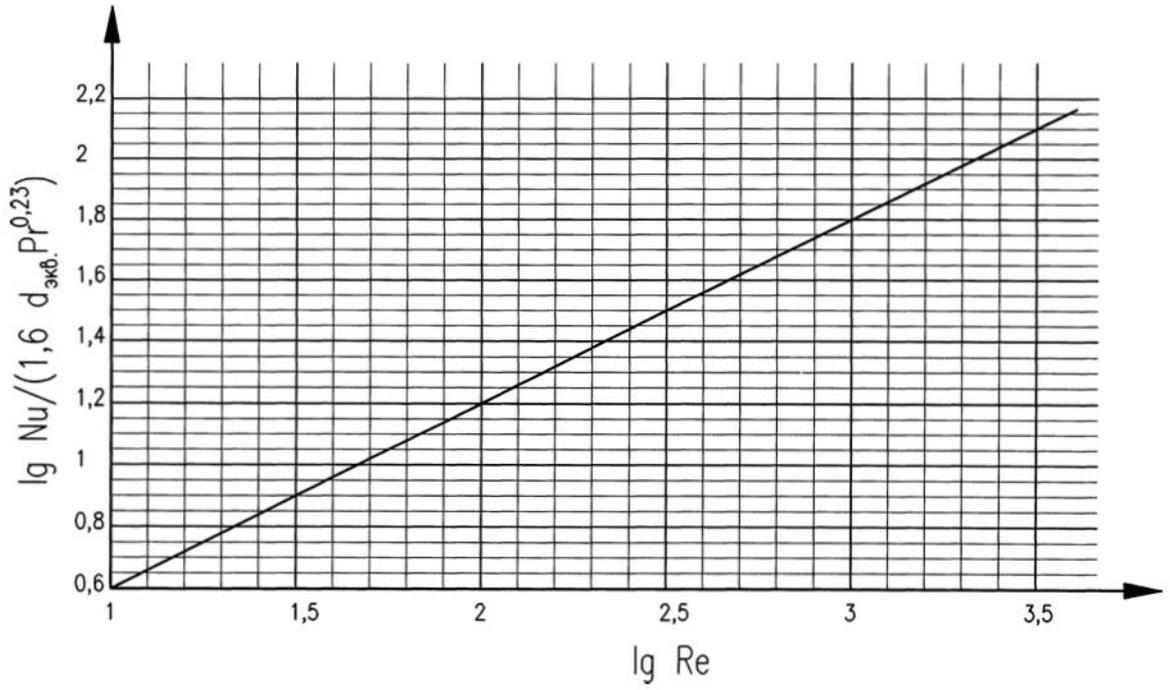
Графики критериальных зависимостей для расчета теплоотдачи при:  
 вынужденном движении внутри труб для переходной области ( $2300 < Re < 10000$ )



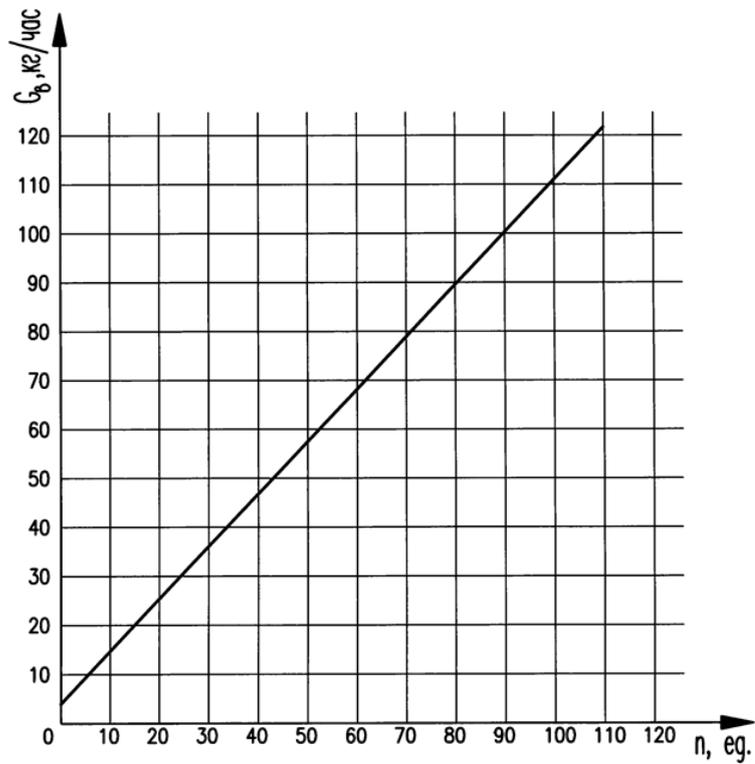
вынужденном движении внутри труб для турбулентной области ( $Re > 10000$ )



движении теплоносителя в межтрубном пространстве пучка труб (продольное обтекание)



Тарировочный график ротаметра для расхода воды



$$\underline{G_B = 1,07n + 4}$$

Давление насыщенного водяного пара над водой, мм рт. ст.

Градусы Цельсия	Десятые доли градуса									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	9,209	9,271	9,333	9,395	9,458	9,521	9,585	9,649	9,714	9,779
11	9,844	9,910	9,976	10,042	10,109	10,176	10,244	10,312	10,380	10,449
12	10,518	10,588	10,658	10,728	10,799	10,870	10,941	11,013	11,085	11,158
13	11,231	11,305	11,379	11,453	11,528	11,604	11,680	11,756	11,833	11,910
14	11,987	12,065	12,144	12,223	12,302	12,382	12,462	12,543	12,624	12,706
15	12,788	12,870	12,958	13,037	13,121	13,205	13,290	13,375	13,461	13,547
16	13,634	13,721	13,809	13,898	13,987	14,076	14,166	14,256	14,347	14,438
17	14,530	14,622	14,715	14,809	14,903	14,997	15,092	15,188	15,284	15,380
18	15,477	15,575	15,673	15,772	15,871	15,971	16,071	16,171	16,272	16,374
19	16,477	16,581	16,685	16,789	16,894	16,999	17,105	17,212	17,319	17,427
20	17,533	17,644	17,753	17,863	17,974	18,085	18,197	18,309	18,422	18,536
21	18,650	18,765	18,880	18,996	19,113	19,231	19,349	19,468	19,587	19,707
22	19,827	19,948	20,070	20,193	20,316	20,440	20,565	20,690	20,815	20,941
23	21,068	21,196	21,324	21,453	21,583	21,714	21,845	21,977	22,110	22,243
24	22,377	22,512	22,648	22,785	22,922	23,060	23,198	23,337	23,476	23,616
25	23,756	23,897	24,039	24,182	24,326	24,471	24,617	24,764	24,912	25,060
26	25,209	25,359	25,509	25,660	25,812	25,964	26,117	26,271	26,422	26,582
27	26,739	26,897	27,055	27,214	27,374	27,535	27,696	27,858	28,021	28,185
28	28,349	28,514	28,680	28,847	29,015	29,184	29,354	29,525	29,697	29,870
29	30,043	30,217	30,392	30,568	30,745	30,923	31,102	31,281	31,461	31,642
30	31,824	32,007	32,191	32,376	32,561	32,747	32,934	33,122	33,312	33,503
31	33,695	33,888	34,082	34,276	34,471	34,667	34,864	35,062	35,261	35,462
32	35,663	35,865	36,068	36,272	36,477	36,683	36,891	37,099	37,308	37,518
33	37,729	37,942	38,155	38,369	38,584	38,801	39,018	39,237	39,457	39,677
34	39,898	40,121	40,344	40,569	40,796	41,023	41,251	41,480	41,710	41,942
35	42,175	42,409	42,644	42,880	43,117	43,355	43,595	43,836	44,078	44,320
36	44,563	44,808	45,054	45,301	45,549	45,799	46,050	46,302	46,566	46,811
37	47,067	47,324	47,582	47,841	48,102	48,364	48,627	48,891	49,157	49,424
38	49,692	49,961	50,231	50,202	50,774	51,048	51,323	51,600	51,897	52,160
39	52,442	52,725	53,009	53,294	53,580	53,867	54,156	54,446	54,737	55,030
40	55,324	55,610	55,910	56,210	56,310	56,810	57,110	57,410	57,720	58,030
41	58,340	58,650	58,960	59,270	59,580	59,900	60,220	60,540	60,860	61,180
42	61,500	61,820	62,140	62,470	62,800	63,130	63,460	63,790	64,120	64,460
43	64,800	65,140	65,480	65,820	66,160	66,510	66,860	67,210	67,560	67,910
44	68,260	68,610	68,970	69,330	69,690	70,050	70,410	70,770	71,140	71,510
45	71,880	72,250	72,620	72,990	73,360	73,740	74,120	74,500	74,880	75,260
46	75,650	76,040	76,430	76,820	77,210	77,600	78,00	78,400	78,800	79,200
47	79,600	80,000	80,410	80,820	81,230	81,640	82,050	82,460	82,870	83,290
48	83,710	84,130	84,560	84,990	85,420	85,850	86,280	86,710	87,140	87,580
49	88,020	88,460	88,900	89,340	89,790	90,240	90,690	91,140	91,590	92,050
50	92,510	92,970	93,430	93,890	94,360	94,820	95,290	95,770	96,240	96,720
51	97,200	97,680	98,160	98,640	99,130	99,620	100,110	100,600	101,100	101,590
52	102,09	102,59	103,10	103,60	104,11	104,62	105,13	105,64	106,16	106,68
53	107,20	107,72	108,24	108,76	109,29	109,82	110,35	110,83	111,43	111,97
54	112,51	113,05	113,59	114,14	114,69	115,24	115,80	116,36	116,92	117,48
55	118,04	118,60	119,16	119,73	120,21	120,89	121,47	122,05	122,63	123,21

**Гужель Юлия Александровна,**

доцент кафедры «Химия и химическая технология» АмГУ, канд. техн. наук

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

*Лабораторный практикум. Учебное пособие*

Изд-во АмГУ. Подписано к печати \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.2022.

Усл. печ. л. 9,81

Формат 60x84/16.

Тираж 30. Заказ