

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
Невинномысский технологический институт (филиал)

***ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ***

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторным занятиям для студентов направления  
15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Невинномысск 2021

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта в части содержания и уровня подготовки бакалавров по направлению 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств.

Указания содержат теоретические обоснования, описания опытных установок, методику и порядок проведения лабораторных работ и обработки экспериментальных данных, указания по технике безопасности, перечень контрольных вопросов для самоподготовки по теме работ и список рекомендуемой литературы.

Составители: *доц. А.И. Свидченко, ст. преп. Е.Б. Новоселова, доц. А.М. Новоселов*

Рецензент *доц. А.Л. Проскурнин*

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.....	7
ИЗУЧЕНИЕ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА ЖИДКОСТИ .....	7
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.....	15
ИЗУЧЕНИЕ ПНЕВМОТРАНСПОРТА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА .....	15
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.....	24
ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ОТСТОЙНИКА .....	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.....	31
ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЦЕНТРИФУГИ.....	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.....	37
ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЦИКЛОНА.....	37
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.....	48
ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА.....	48
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7.....	60
ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ .....	60
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8.....	69
ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	69
ЛИТЕРАТУРА.....	83

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Методические указания составлены на современном научном уровне и рассчитаны на студентов, обладающих достаточной подготовкой по разделам дисциплин: информатика, математика, физика, основы компьютерной графики, и др.

Методические указания составлены для выполнения лабораторных работ курса «Технологические процессы и оборудование» с учетом требований стандарта третьего поколения ФГОС ВО для подготовки бакалавров направления 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств.

При подготовке издания учтены основные изменения в программе дисциплины и тенденции ее развития.

В результате освоения материала методических указаний по дисциплине «Основы проектирования и оборудование» ОП студент приобретает следующие компетенции:

*профессиональные:* ПК-1: способностью собирать и анализировать исходные информационные данные для проектирования технологических процессов изготовления продукции, средств и систем автоматизации, контроля, технологического оснащения, диагностики, испытаний, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством; участвовать в работах по расчету и проектированию процессов изготовления продукции и указанных средств и систем с использованием современных информационных технологий, методов и средств проектирования; ПК-2: способностью выбирать основные и вспомогательные материалы для изготовления изделий, способы реализации основных технологических процессов, аналитические и численные методы при разработке их математических моделей, методы стандартных испытаний по определению физико-механических свойств и технологических показателей материалов и готовых изделий, стандартные методы их проектирования, прогрессивные методы эксплуатации изделий; ПК-3: готовностью применять способы рационального использования сырьевых, энергетических и других видов ресурсов, современные методы разработки малоотходных, энергосберегающих и

экологически чистых технологий, средства автоматизации технологических процессов и производств; ПК-16: способностью участвовать в организации мероприятий по повышению качества продукции, производственных и технологических процессов, техническому и информационному обеспечению их разработки, испытаний и эксплуатации, планированию работ по стандартизации и сертификации, а также актуализации регламентирующей документации; ПК-31: способностью выявлять причины появления брака продукции, разрабатывать мероприятия по его устранению, контролировать соблюдение технологической дисциплины на рабочих местах; ПК-32: способностью участвовать во внедрении и корректировке технологических процессов, средств и систем автоматизации, управления, контроля, диагностики при подготовке производства новой продукции и оценке ее конкурентоспособности; ПК-33: способностью участвовать в разработке новых автоматизированных и автоматических технологий производства продукции и их внедрении, оценке полученных результатов, подготовке технической документации по автоматизации производства и средств его оснащения.

Содержание методических указаний соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования к содержанию дисциплины «Технологические процессы и оборудование» для студентов направления 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств.

## ВВЕДЕНИЕ

Приобретаемые компетенции ОП при освоении материала методических указаний – ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-16, ПК-31, ПК-32, ПК-33. Изучив этот материал, бакалавр будет:

Знать	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Теоретические основы типовых процессов, протекающих в технологическом оборудовании.</li><li>2. Устройство и работу основного технологического оборудования.</li><li>3. Принципы проектирования технологического оборудования.</li></ol>
Уметь	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Собирать и анализировать исходные информационные данные для проектирования технологических процессов изготовления продукции.</li><li>2. Применять способы рационального использования сырьевых, энергетических и других видов ресурсов.</li><li>3. Использовать теоретические основы типовых процессов, протекающих в технологическом оборудовании</li></ol>
Владеть	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Способностью участвовать в организации мероприятий по повышению качества продукции, производственных и технологических процессов, техническому и информационному обеспечению их разработки, испытаний и эксплуатации.</li><li>2. Способностью участвовать во внедрении и корректировке технологических процессов, средств и систем автоматизации, управления, контроля, диагностики.</li><li>3. Принципами анализа технологических процессов и оборудования отрасли как объектов управления.</li></ol>

Ниже приведены материалы для выполнения лабораторных работ, рассматриваемые по основным темам дисциплины, согласно ФГОС ВО и рабочей учебной программы.

## ИЗУЧЕНИЕ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА ЖИДКОСТИ

**Цель и содержание работы.** Целью работы является изучение закономерностей транспортирования жидкостей по трубопроводу. Содержанием работы является опытное определение расхода и потерь напора в потоке движущейся жидкости.

### Теоретическое обоснование

Движение жидкостей и газов по технологическим трубопроводам (транспортирование или «перекачивание») относится к гидромеханическим процессам (практической гидравлике) и подчиняется общим закономерностям для обеих сред. Трубопроводный транспорт широко используется в промышленности для перемещения потоков сырья, различных реагентов, промежуточных, конечных и товарных продуктов между отдельными сосудами, аппаратами и другими устройствами технологической установки. Его также используют в магистральных трубопроводах для подачи сырой нефти, газа, воды.

Трубопроводы изготавливают из труб, чаще всего круглого сечения, стальных, чугунных, неметаллических. При изготовлении трубопровода используют повороты, отводы, сужения, различную арматуру (вентили, клапаны, задвижки и др.).

Перемещение потока в трубопроводе происходит за счет сообщения ему некоторого избыточного давления (напора, энергии) в начальной точке трассы по сравнению с конечной. Именно перепад давлений является движущей силой данного процесса.

Для создания необходимого напора потока на входе в трубопровод используют специальные машины: насосы, компрессоры, газодувки, вентиляторы. Иногда напор жидкости обеспечивается ее гидростатическим столбом.

В соответствии с уравнением Бернулли для реальных жидкостей движение потока среды в трубопроводе сопровождается убылью (потерей) его энергии на преодоление сил трения о стенки, на преодоле-

ние деформаций потока при изменении направления движения, величины проходного сечения и др., на преодоление разности высотных отметок. Это проявляется в уменьшении напора или давления по длине трассы. Поэтому при транспортировании сред на большие расстояния зачастую приходится предусматривать промежуточные (линейные) насосные или компрессорные станции, вновь сообщаемые потоку дополнительную энергию.

При проектировании трубопроводного транспорта жидкостей и газов необходимо решить ряд задач. В качестве исходных данных обычно задают расход среды и ее свойства (плотность, вязкость), требуемый напор (давление) в конечной точке, характеристику трассы (длина, перепад высот, количество и типы арматуры и др.).

Прежде всего, определяют экономически выгодный диаметр трубопровода. Для этого используют уравнение

$$d = \sqrt{\frac{4V}{\pi w}}, \text{ м}, \quad (1.1)$$

где  $V$  – расход среды при рабочих параметрах,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $w$  – оптимальная скорость движения (соответствующая минимуму приведенных затрат на трубопровод),  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\pi = 3,14$ .

Рекомендации по выбору скорости потока с учетом его вида, вязкости имеются в справочной литературе.

Рассчитанное значение диаметра трубопровода округляют до ближайшего по стандарту, а фактическое значение скорости потока уточняют из вышеприведенной формулы.

На следующем этапе определяют требуемый напор потока  $h_{\text{вх}}$  (давление  $p_{\text{вх}}$ ) на входе в трубопровод

$$h_{\text{вх}} = h_{\text{вых}} + \Delta h_{\text{тр}} + \sum_i \Delta h_{\text{мси}} \pm h, \text{ м ст ж}, \quad (1.2)$$

или 
$$p_{\text{вх}} = p_{\text{вых}} + \Delta p_{\text{тр}} + \sum_i \Delta p_{\text{мси}} \pm \rho gh, \text{ Па},$$

где  $h_{\text{вых}}$ ,  $p_{\text{вых}}$  – напор, давление потока при выходе из трубопровода, м, Па;  $\Delta h_{\text{тр}}$ ,  $\Delta p_{\text{тр}}$  – потери напора, давления потоком на преодоление сил трения, м, Па;  $\Delta h_{\text{мси}}$ ,  $\Delta p_{\text{мси}}$  – потери напора, давления потоком на преодоление местных сопротивлений ( $i=1\dots n$ ), м, Па;  $\rho$  – плотность

потока при рабочих условиях, кг/м<sup>3</sup>; g – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>; h – разность высот в начальной и конечной точках трубопровода.

Потери напора в трубопроводе на трение при установившемся движении жидкости зависят от его длины (потери по длине) и определяются по формуле

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{w^2}{2g}, \text{ м} \quad (1.3)$$

или

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho w^2}{2}, \text{ Па},$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения; L – длина трубопровода, м; d – внутренний диаметр трубопровода, м.

Расчет коэффициента трения  $\lambda$  при движении реальных жидкостей по трубопроводам является одним из основных прикладных вопросов гидродинамики. На его величину оказывает влияние режим течения жидкости (ламинарный, турбулентный, степень развития турбулентности), шероховатость стенки трубы. Для практических расчетов используют приводимые в справочной литературе различные эмпирические уравнения вида

$$\lambda = f(\text{Re}),$$

где  $\text{Re} = w \cdot d / \nu$  – критерий (или число) Рейнольдса, характеризующий режим течения потока,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости среды, м<sup>2</sup>/с.

Потери напора в трубопроводе на местных сопротивлениях определяются по формуле

$$h_{\text{мси}} = \zeta_i \cdot \frac{w^2}{2g}, \text{ м} \quad (1.4)$$

$$\Delta p_{\text{мси}} = \zeta_i \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}, \text{ Па},$$

где  $\zeta_i$  – коэффициент местного i-го сопротивления.

Численное значение коэффициента местного сопротивления зависит от типа и вида местного сопротивления, числа Рейнольдса, ше-

роховатости стенок, влияние предыдущих местных сопротивлений и принимается по справочным данным.

На следующем этапе проектирования трубопровода подбирают насос. Для этого предварительно рассчитывают его мощность привода

$$N = k \cdot V \cdot p_{\text{вх}} / \eta, \text{ Вт}, \quad (1.5)$$

где  $k$  - коэффициент запаса мощности ( $k = 1,1 \dots 1,3$ );  $\eta$  – к.п.д. насоса.

Комплекс характеристик насоса  $V$ ,  $p_{\text{вх}}$  ( $h_{\text{вх}}$ ),  $N$  позволяют подобрать по каталогу необходимый типоразмер насоса, а затем согласовать его работу с проектируемой трубопроводной системой.

Для управления работой трубопроводной системы необходимо иметь информацию о расходе среды, величине давления на входе и в конце трассы, о профиле температуры по длине трубопровода (для вязких и застывающих сред). Эти данные получают на основе показаний соответствующих контрольно-измерительных приборов, для подсоединения которых к трубопроводу уже на стадии проектирования предусматривают специальные устройства (штуцера, муфты, бобышки и др.)

### **Аппаратура и материалы**

При выполнении опытной части работы используются:

- комплексный экспериментальный стенд;
- термометр;
- стакан.

### **Указания по технике безопасности**

Для безопасного проведения лабораторной работы необходимо:

- проводить работу только в присутствии лаборанта;
- не превышать установленного расхода воды;
- выполнять работу в строгом соответствии с методическими указаниями.

## Методика и порядок выполнения работы

Схема лабораторного стенда для экспериментального изучения трубопроводного транспорта жидкостей представлена на рисунке 1.1.

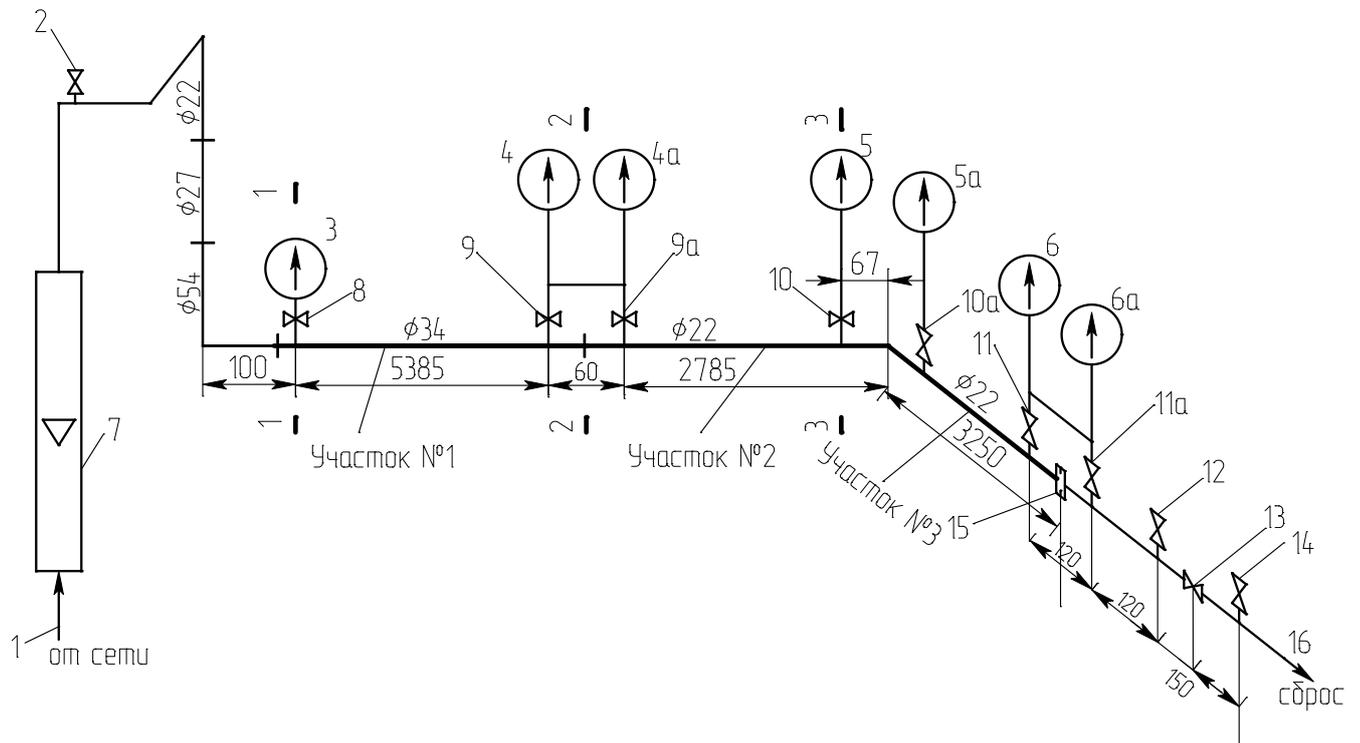


Рисунок 1.1 – Схема экспериментальной установки: 1 – вода от сети; 2, 8, 9, 9а, 10, 10а, 11, 11а, 12, 13, 14 – вентили; 3, 4, 4а, 5, 5а, 6, 6а – манометры; 7 – ротаметр; 15 - диафрагма; 16 – слив.

Установка включает в себя трубопровод переменного сечения, состоящий из следующих элементов:

- прямой участок 1  $\text{Ø } 34 \text{ мм}$ ,  $l = 5485 \text{ мм}$ ;
- прямой участок 2  $\text{Ø } 22 \text{ мм}$ ,  $l = 3310 \text{ мм}$ ;
- поворот на  $90^\circ$ ;
- прямой участок 3  $\text{Ø } 22 \text{ мм}$ ,  $l = 3630 \text{ мм}$ ;
- диафрагма;
- вентиль.

Для измерения перепадов давления трубопровод снабжен манометрами. Ротаметр 7 служит для измерения расхода воды. Регулировка расхода воды осуществляется вентилями. Диафрагма 15 и вентиль 13 создают в трубопроводе местные сопротивления.

Работа проводится в следующем порядке.

1. Установить с помощью вентиля 2 и 13 определенный расход воды.
2. Измерить расход воды по ротаметру 7.
3. Измерить давления в начале и конце трубопровода  $p_1$  и  $p_2$  по манометрам 3 и 6а.
4. Набрать воды в стакан и измерить ее температуру  $t^{\circ}\text{C}$  для определения вязкости по справочным данным.
5. Занести результаты измерений в таблицу 1.1.
6. Повторить измерения при нескольких отличающихся расходах.

Таблица 1.1 - Результаты измерений.

№ опыта	Расход воды по ротаметру, V		Давление по манометру, Па		Перепад давления в трубопроводе, Па $\Delta p_{\text{оп}} = p_1 - p_2$
	л/мин	м <sup>3</sup> /с	3	6а	
1					
2					
3					

### Оформление отчета

В отчёте о выполненной работе должны содержаться следующие данные.

Дата проведения работы.

Цель работы.

Схема лабораторной установки (упрощенная).

Характеристика трубопровода.

Температура воды,  $^{\circ}\text{C}$ .

Результаты измерений и расчетов (таблицы 1.1 и 1.2).

Анализ полученных результатов.

Обработку опытных данных проводят в следующем порядке.

1. Расход воды в л/мин по ротаметру переводят в м<sup>3</sup>/с.
2. Вычисляют скорость движения потока на участках 1 и 2-3 по формуле

$$w = \frac{4V}{\pi d^2}, \text{ м/с.}$$

3. По температуре воды  $t^{\circ}\text{C}$  из справочных данных находят кинематическую вязкость  $\nu$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

4. Рассчитывают числа Рейнольдса по формуле

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d}{\nu}.$$

5. Рассчитывают потери напора по формулам (1.3, 1.4) и общие потери для трубопровода

$$\Delta p_{\text{теор}} = \Delta p_{\text{тр1}} + \Delta p_{\text{тр2-3}} + \sum \Delta p_{\text{мсi}}$$

6. Сравнивают теоретическое значение потерь напора с опытным

$$\delta p = \frac{\Delta p_{\text{оп}} - \Delta p_{\text{теор}}}{\Delta p_{\text{оп}}} \cdot 100, \%$$

7. Рассчитывают давление на входе в трубопровод по формуле (1.2).

8. Рассчитывают необходимую мощность насоса для транспортирования жидкости в условиях опыта по формуле (1.5).

9. Заносят результаты вычислений в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты вычислений

№ опыта	Скорость $w$ , м/с	Число Рейнольдса, $\text{Re}$	Потери на трение $\Delta p_{\text{тр}}$	Потери местные $\sum \Delta p_{\text{мсi}}$	Потери общие $\Delta p_{\text{теор}}$	Давление на входе, Па	Мощность, Вт
Участок 1 $d = 34 \times 2 \text{ мм}$							
1							
2							
3							
Участок 2-3 $d = 22 \times 2 \text{ мм}$							
1							
2							
3							

### Контрольные вопросы

1. Какова роль трубопроводного транспорта в технологических процессах?

2. Какие машины используют при транспорте сред по трубопроводам?

3. Как определяется диаметр трубопровода?

4. Какие причины вызывают потери напора в трубопроводе?

5. Как вычисляются потери напора по длине трубопровода?

6. Как вычисляются потери напора на местных сопротивлениях?

7. Как подобрать насос для «перекачивания» жидкости?

8. Какие параметры подлежат контролю при трубопроводном транспорте сред?

9. Какие технические решения целесообразны при транспортировании высоковязких и застывающих сред?

## ИЗУЧЕНИЕ ПНЕВМОТРАНСПОРТА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

**Цель и содержание работы.** Целью работы является практическое ознакомление с пневмотранспортом сыпучих (зернистых) материалов. Содержанием работы является опытное определение режимных параметров процесса.

### Теоретическое обоснование

Некоторые процессы химической технологии осуществляются при контактировании газов и паров с поверхностью твердых зернистых материалов: каталитические, адсорбционные, сушка и др.

При движении потока через слой зернистого материала последний может находиться в одном из трех гидродинамических состояний: неподвижном, псевдооживленном и пневмотранспорта.

Явление массового уноса твердых частиц потоком газа, движущимся через слой, называют пневмотранспортом. Пневмотранспорт материала начинается при скорости потока выше скорости витания частиц, т.е. такой скорости, при которой подъемная сила, действующая на каждую частицу, станет больше, чем ее вес. В этом случае частицы увлекаются потоком и начинают двигаться по трубопроводу плотным или разреженным слоем.

Пневмотранспорт зернистых материалов относится к гидромеханическим процессам и используется в промышленности для перемещения и технологической обработки (сушки, адсорбции, химических превращений).

Для характеристики режима пневмотранспорта зернистых материалов используют ряд показателей: порозность и концентрацию, скорость транспортирующего агента и частиц, скорость и коэффициент скольжения, потерю напора при движении потока.

Расходная массовая концентрация  $m$  (коэффициент взвеси) определяется следующим образом

$$m = G_q/G, \quad (2.1)$$

где  $G_q$  – массовый расход частиц, кг/с;  $G$  – массовый расход транспортирующего агента, кг/с.

Расходная объемная концентрация  $\lambda$  (подача) равна

$$\lambda = V_q/V, \quad (2.2)$$

где  $V_q$  – объемный расход частиц, м<sup>3</sup>/с;  $V$  – объемный расход транспортирующего агента, м<sup>3</sup>/с.

Скорость движения частиц  $w_q$  при пневмотранспорте меньше скорости движения транспортирующего агента  $w$ , который скользит относительно частиц со скоростью  $w_c$ . С учетом порозности  $\varepsilon$  скорость скольжения потока, отнесенная к полному сечению пневмопровода, равна

$$w_c = w - \varepsilon \cdot w_q. \quad (2.3)$$

Коэффициент скольжения показывает, во сколько раз скорость агента превышает скорость движения частиц, т.е.

$$k_c = w/w_q. \quad (2.4)$$

По промышленным данным  $k_c = 1,3 \dots 6$ .

Различные виды концентраций связаны соотношением

$$m = \lambda \cdot \rho_q/\rho, \quad (2.5)$$

где  $\rho$  – плотность транспортирующего агента, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_q$  – плотность материала частиц, кг/м<sup>3</sup>.

При расчете пневмотранспорта зернистого материала необходимо определить перечисленные выше параметры.

Для вертикального пневмотранспорта может быть использована зависимость между критериями Рейнольдса  $Re$  и Архимеда  $Ar$ , полученная для "кипящего" слоя. При этом, однако, критерий Рейнольдса определяется по относительной скорости движения агента  $w_c$ , т.е.

$$Re_c = Ar \cdot \varepsilon^{4,75} / [18 + 0,61(Ar \cdot \varepsilon^{4,75})^{0,5}], \quad (2.6)$$

где  $Re_c = w_c \cdot d \cdot \rho / \mu$ ;  $Ar = d^3 (\rho_q - \rho) \cdot \rho \cdot g / (\mu)^2$  (\*);  $d$  – диаметр частиц, м;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости агента, Па·с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Расходы транспортирующего агента и частиц можно представить следующим образом

$$V_q = w_q \cdot (1-\varepsilon) \cdot F; \quad V = w \cdot F,$$

где  $F$  - площадь поперечного сечения пневмопровода,  $m^2$ .

Подставляя значения  $V_{\text{ч}}$  и  $V$  в формулу (2.2), получим

$$\lambda = w_{\text{ч}} \cdot (1 - \varepsilon) / w. \quad (2.7)$$

Совместно решая уравнения (2.4) и (2.7), получим

$$w = w_{\text{с}} \left\{ (1 - \varepsilon) / [1 - \varepsilon(1 + \lambda)] \right\}$$

или

$$Re = Re_{\text{с}} \left\{ (1 - \varepsilon) / [1 - \varepsilon(1 + \lambda)] \right\},$$

где  $Re = w \cdot d \cdot \rho / \mu$  (\*\*).

С учетом формулы (2.6) для  $Re_{\text{с}}$  получим следующее уравнение для расчета режимных параметров пневмотранспорта

$$Re = \left\{ (1 - \varepsilon) / [1 - \varepsilon(1 + \lambda)] \right\} \cdot \left\{ Ar \cdot \varepsilon^{4,75} / [18 + 0,61(Ar \cdot \varepsilon^{4,75})^{0,5}] \right\}. \quad (2.8)$$

При заданных  $\lambda$  (или  $m$ ), скорости потока  $w$  (т.е.  $Re$ ) и  $d$ ,  $\rho_{\text{ч}}$  (т.е.  $Ar$ ) по формуле (2.8) рассчитывается порозность потока (методом приближений при  $0,4 < \varepsilon < 1$ ).

Скорость частиц находят из формулы (2.7), скорость скольжения и коэффициент скольжения определяют по формулам (2.3, 2.4). Истинная массовая концентрация частиц в пневмопроводе равна

$$\rho_{\text{п}} = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_{\text{ч}} + \varepsilon \cdot \rho. \quad (2.9)$$

Расчет пневмотранспорта возможен и в другой последовательности в зависимости от конкретных условий решаемой задачи и наличия исходных данных.

Общие потери напора при пневмотранспорте зернистого материала складываются из следующих величин

$$\Delta p = \Delta p_{\text{ст}} + \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3, \text{ Па}, \quad (2.10)$$

где  $\Delta p_{\text{ст}}$  – статический напор, Па

$$\Delta p_{\text{ст}} = \rho_{\text{п}} \cdot g \cdot H; \quad (2.11)$$

$\Delta p_1$  – потеря напора на трение агента о стенки пневмопровода, Па

$$\Delta p_1 = \lambda_1 \cdot H_1 \cdot \rho \cdot w^2 / (2 \cdot D); \quad (2.12)$$

$\Delta p_2$  – потеря напора на трение частиц о стенки пневмопровода, Па

$$\Delta p_2 = \lambda_2 \cdot H_1 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot w_{\text{ч}}^2 \cdot (1 - \varepsilon) / (2 \cdot D); \quad (2.13)$$

$\Delta p_3$  - потеря напора на разгон транспортируемого материала, Па

$$\Delta p_3 = 4 \cdot G_{\text{ч}} \cdot w_{\text{ч}} / (\pi \cdot D^2). \quad (2.14)$$

В формулах (2.11 - 2.14), кроме встречавшихся ранее величин, используются:  $H$  – высота подъема материала, м;  $H_1$  – приведенная (с учетом местных сопротивлений) длина пневмопровода, м;  $D$  – диаметр пневмопровода, м;  $\lambda_1$  – коэффициент трения агента о стенки пневмопровода;  $\lambda_2$  – коэффициент трения частиц о стенки пневмопровода ( $\lambda_2 \approx 0,05$ ).

Длина пневмопровода  $H_1$  равна

$$H_1 = \sum_{i=1}^n l_i + \sum_{j=1}^m l_j^3, \quad (2.15)$$

где  $l_i$  - длина  $i$  - го прямолинейного участка, м;  $l_j^3$  - эквивалентная длина  $j$  - го местного сопротивления (для резкого поворота на  $90^\circ$   $l_j^3 \approx (25 \dots 50) D$ ; для плавного поворота на  $90^\circ$   $l_j^3 \approx 15D$ ), м.

Коэффициент трения агента  $\lambda_1$  для гладких или шероховатых труб определяют по формулам гидравлики.

Найденные потери напора при пневмотранспорте зернистого материала позволяют рассчитать мощность привода газоподающего устройства (Вт), расходующую на транспортирование, и подобрать типоразмер вентилятора, газодувки

$$N = k \cdot V \cdot \Delta p / \eta, \quad (2.16)$$

где  $k$  - коэффициент запаса мощности ( $k = 1,1 \dots 1,3$ );  $\eta$  – к.п.д. газоподающего устройства.

Для управления процессом пневмотранспорта необходимо иметь информацию о расходе газа-носителя, величине давления на входе в трубопровод, о стабильности подачи транспортируемого материала дозирующим устройством, о температуре процесса. Эти данные получают на основе показаний соответствующих контрольно-измерительных приборов.

### **Аппаратура и материалы**

При выполнении опытной части работы используются:

- опытная установка для реализации пневмотранспорта;
- образец сыпучего материала;
- воздух от сети;

- лабораторные весы, секундомер.

### Указания по технике безопасности

Для безопасного проведения опытной части работы необходимо:

- проводить работу только в присутствии лаборанта;
- не превышать расходы воздуха в системе сверх рекомендованных преподавателем;
- выполнять работу в строгом соответствии с методическими указаниями.

### Методика и порядок выполнения работы

Схема установки приведена на рисунке 2.1.

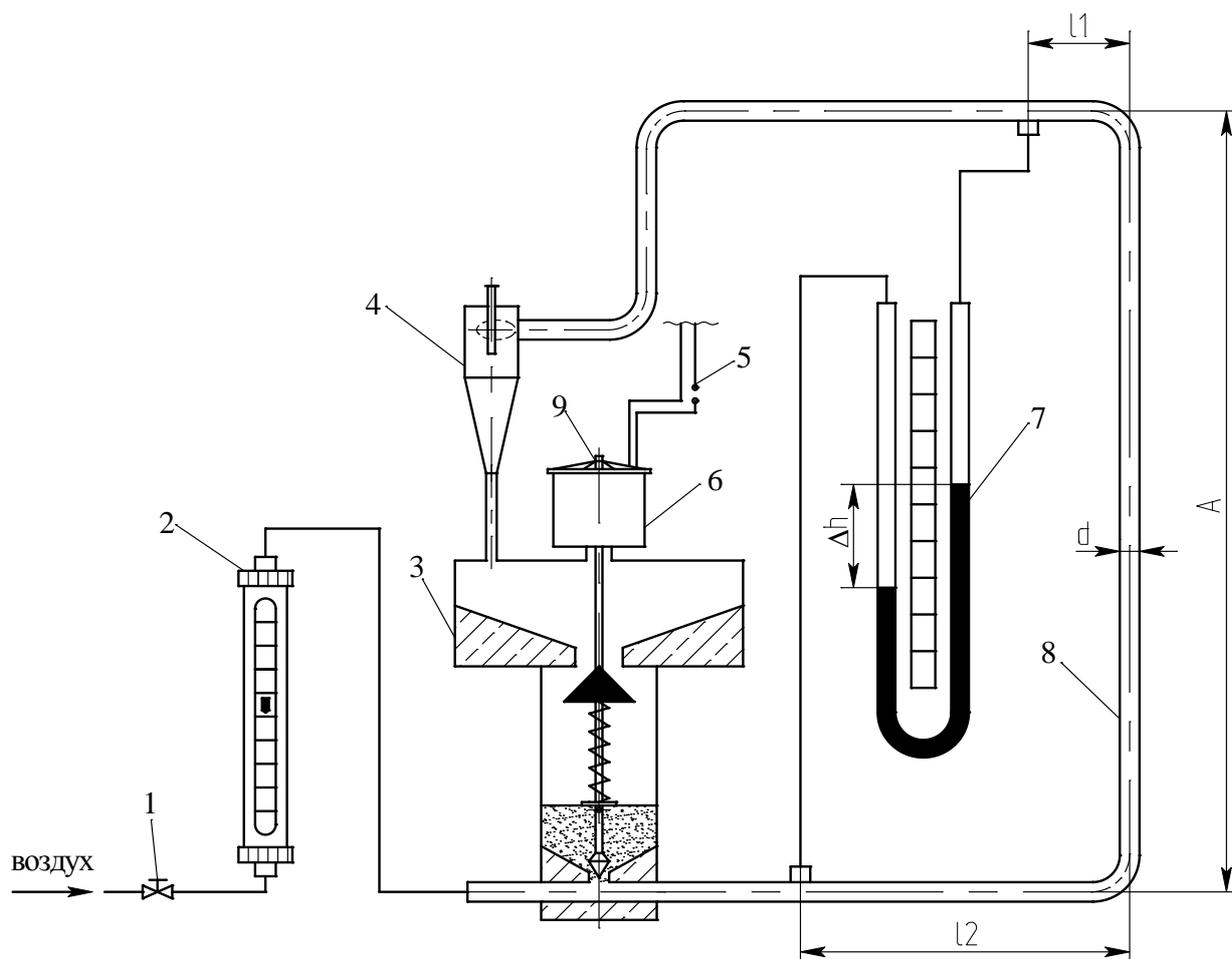


Рисунок 2.1 – Схема установки: 1– вентиль; 2 – ротаметр; 3 – бункер–питатель; 4 – циклон; 5 – выключатель; 6 – электромагнит; 7 – U – образный жидкостный манометр; 8 – пневмопровод; 9 – регулировочный винт.

Установка включает пневмопровод из гибкого шланга 8, в который от сети через ротаметр 2 подается транспортирующий агент (воздух). Транспортируемый материал поступает в пневмопровод из бункера-питателя 3. Для улавливания транспортируемых частиц служит циклон 4, который возвращает зернистый материал в приемник бункера-питателя.

Дозирование зернистого материала осуществляется регулированием величины зазора для его прохода в транспортную линию. Это достигается подъемом запорного конуса в питателе на различную (заранее заданную) высоту. Запорный конус связан штоком со стальным сердечником электромагнита 6, катушка которого подключена через выключатель 5 к источнику тока. Величина хода сердечника в катушке (вверх) регулируется с помощью специального ограничителя (винта) 9. В момент подачи материала в транспортную линию (подъема сердечника электромагнита) выходное отверстие бункера запирается снизу вторым конусом с пружиной, который препятствует проходу уловленных частиц в питатель.

После завершения транспорта всей порции материала и отключения электромагнита сердечник падает вниз. При этом закрывается проход в пневмопровод, а материал ссыпается из приемника в питатель. Перепад давления на участке пневмопровода измеряется U-образным манометром 7. Подключение установки к воздушной сети осуществляется через вентиль 1, который одновременно служит для регулирования подачи воздуха в пневмопровод.

Опыты проводят в следующем порядке. Проверяют наличие зернистого материала в питателе и выясняют его массу. При необходимости взвешивают порцию материала и засыпают его через выхлопную трубу циклона в приемник. В предварительных опытах устанавливают необходимую величину скорости транспортирующего агента. Для этого подают воздух в систему и замыкают цепь соленоида; материал поступает в транспортную линию. Расход воздуха подбирают таким, чтобы все частицы из стояка были вынесены в приемник бункера-питателя. Установленный расход агента фиксируют. После этого

размыкают цепь соленоида и пересыпают материал из приемника в питатель.

В основных опытах определяют продолжительность пневмотранспорта и потери давления на участке пневмопровода. Расход воздуха устанавливают минимально необходимый (по результатам предварительных опытов) или несколько больше. В момент замыкания цепи соленоида (начало опыта) включают секундомер. После выноса всех частиц (по визуальному контролю) секундомер выключают. В момент пневмотранспорта фиксируют наибольшую величину перепада давления по U-образному манометру. В 2-3 повторных опытах изменяют при помощи регулирующего винта зазор для прохода материала в пневмопровод (концентрацию частиц в потоке). Опыты проводят в описанном выше порядке, а результаты измерений заносят в протокол.

### Оформление отчета

В отчёте о выполненной работе должны содержаться следующие данные.

Дата проведения работы.

Цель работы.

Схема лабораторной установки.

Характеристика частиц.

Характеристика трубопровода.

Температура воздуха, °С.

Барометрическое давление, Па (мм рт ст).

Результаты измерений и расчетов (таблицы 2.1 и 2.2).

Анализ полученных результатов.

Обработку опытных данных проводят в следующем порядке.

1. Массовый расход воздуха в системе определяют по формуле

$$G = V \rho, \text{ кг/м}^3,$$

где  $V$  - объемный расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\rho$  - плотность воздуха при параметрах опыта,  $\text{кг/м}^3$ .

Плотность воздуха рассчитывают по формуле

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{\pi}{\pi_0} \cdot \frac{T}{T_0},$$

где  $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$  - плотность воздуха при  $T_0 = 273,15 \text{ К}$ ;  $\pi_0 = 760 \text{ мм рт ст} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $\pi$  - давление воздуха во время опыта, Па;  $T$  - температура опыта, К.

Значение  $\pi$  находят по формуле

$$\pi = \pi_{\text{БАР}} + b \Delta p,$$

где  $\pi_{\text{БАР}}$  – атмосферное давление, Па;  $\Delta p$  – измеренный перепад давления в системе на участке пневмотранспорта, Па;  $b$  – эмпирический коэффициент.

2. Массовый расход транспортируемого материала определяют по формуле

$$G_{\text{ч}} = G_{\text{ч}}^* / \tau, \text{ кг/с},$$

где  $G_{\text{ч}}^*$  – масса загруженного материала, кг;  $\tau$  – продолжительность опыта, с.

3. Объемный расход материала рассчитывают по формуле

$$V_{\text{ч}} = G_{\text{ч}} / \rho_{\text{ч}},$$

где  $\rho_{\text{ч}}$  - плотность частиц материала,  $\text{кг/м}^3$ .

4. Коэффициент взвеси и подачу рассчитывают по формулам (2.1, 2.2).

5. Скорость потока в пневмопроводе определяют по формуле

$$w = 4V / \pi D^2, \text{ м/с},$$

где  $D$  - диаметр пневмопровода, м;  $\pi = 3,14$ .

Критерии Рейнольдса и Архимеда рассчитывают, как и ранее по формулам (\*) и (\*\*).

6. Порозность транспортируемого слоя рассчитывают методом приближений по формуле (2.8).

7. Истинную массовую концентрацию частиц в пневмопроводе определяют по формуле (2.9).

8. Расчеты скоростей движения частиц, скольжения и коэффициента скольжения выполняют по формулам (2.3, 2.4, 2.7)

$$w_{\text{ч}} = \lambda w / (1 - \varepsilon), \text{ м/с}.$$

9. Потери напора при пневмотранспорте материала определяют по формулам (2.10 - 2.15).

10. Сопоставляют рассчитанные потери напора  $\Delta p_p$  и опытные  $\Delta p_{оп}$  по формуле

$$\Delta = (\Delta p_p - \Delta p_{оп}) / \Delta p_{оп} \cdot 100\%.$$

11. Рассчитывают затраты энергии на пневмотранспорт материала по формуле

$$N = V \cdot \Delta p, \text{ Вт.}$$

Таблица 2.1 - Результаты измерений

№ опыта	Количество материала, $G_q$ , кг	Расход воздуха $V$		Перепад давления $\Delta p$		Продолжительность опыта $\tau$ , с
		по ротаметру	$m^3/c$	мм вод ст	Па	
3-4 опыта						

Таблица 2.2 - Результаты расчетов

№ опыта	Концентрация			Порозрозность $\epsilon$	Скорость, м/с			$k_c$	$\Delta p_p$	$\Delta$ , %
	$m$	$\lambda$	$\rho_{п}$		$w$	$w_q$	$w_c$			

### Контрольные вопросы

1. Что понимают под пневмотранспортом сыпучих материалов и когда он используется?
2. Какое оборудование применяют для пневмотранспорта?
3. Какими показателями характеризуют режим пневмотранспорта?
4. Какими требованиями ограничивают скорость движения частиц при пневмотранспорте?
5. Из каких составляющих складываются потери давления при пневмотранспорте?
6. Как подобрать газоподающее оборудование для систем пневмотранспорта?
7. Как определить мощность, затрачиваемую на пневмотранспорт материала?
8. Какие параметры при пневмотранспорте зернистых материалов подлежат контролю?

## ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ОТСТОЙНИКА

**Цель и содержание работы.** Целью работы является практическое ознакомление с процессом разделения суспензии в статическом отстойнике. Содержанием работы является экспериментальное определение скорости осаждения твердых частиц в вязкой среде.

### Теоретическое обоснование

В ряде процессов химической технологии осуществляют разделение неоднородных систем (суспензий, эмульсий, туманов, пылей) по принципу осаждения (отстаивания) под действием сил тяжести, Архимедовой силы, центробежной силы. Эти процессы реализуют в отстойниках различных типов, пылеосадительных камерах, туманополучителях, отстойных центрифугах.

Наиболее важным параметром, используемым при расчете указанного оборудования, является скорость осаждения диспергированных твердых частиц, капелек жидкости в сплошной среде (внешняя задача гидродинамики). Под этим понимают скорость такого равномерного движения частиц в среде, когда действующие на нее движущая сила и сила сопротивления среды равны. Различают осаждение частиц в свободных и в стесненных условиях. В первом случае концентрация частиц  $X_{CM}$  мала и они не влияют на процесс осаждения друг друга. При этом поперечное сечение аппарата достаточно велико и влияние его стенок (пристеночные эффекты) на процесс осаждения частиц также не проявляются. Во втором случае концентрация частиц значительна (более 4% объ.), или же имеется влияние размеров аппарата на процесс осаждения.

В зависимости от условий осаждения для расчетов скорости осаждения шарообразных частиц используют критериальные уравнения в виде:

– для свободного осаждения ( $X_{CM} \leq 4\%$  объ.)

$$\varphi \cdot Re^2 = 4/3 \cdot Ar \quad (3.1)$$

– для стесненного осаждения ( $X_{CM} > 4$  % объ.)

$$Re_{CT} = \frac{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,6 \cdot \sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}}, \quad (3.2)$$

где  $\varphi$  - коэффициент сопротивления среды;  $Re = w \cdot d / \nu$ ;

$Ar = d^3 \cdot (\rho_{ч} - \rho) \cdot g / (\nu^2 \cdot \rho)$  – критерии Рейнольдса и Архимеда;

$\varepsilon = \nu / (\nu_{ч} + \nu)$  – доля свободного объема среды;  $w$  – скорость осаждения частиц, м/с;  $d$  – диаметр частицы, м;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости среды, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_{ч}$ ,  $\rho$  – плотность частицы и среды, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\nu_{ч}$ ,  $\nu$  – объемы частиц и среды, м<sup>3</sup> или м<sup>3</sup>/с.

Различают три гидродинамических режима осаждения частиц в среде, характеризующихся числовыми значениями критериев подобия  $Re$  и  $Ar$ :

ламинарный:	$Re \leq 0,2$ ;	$Ar \leq 3,6$ ;
переходный:	$0,2 < Re \leq 500$ ;	$3,6 < Ar \leq 84000$ ;
турбулентный:	$Re > 500$ ;	$Ar > 84000$ .

Величина сопротивления среды движению осаждающейся частицы зависит от ряда факторов, в том числе и от режима. При этом коэффициент сопротивления среды равен:

$$\begin{aligned} \varphi &= 24 / Re \text{ – ламинарный режим;} \\ \varphi &= 18,5 / Re^{0,6} \text{ – переходный режим;} \\ \varphi &= 0,44 \text{ – турбулентный режим.} \end{aligned} \quad (3.3)$$

При использовании критериального уравнения (3.1) для расчетов скорости осаждения частиц в свободных условиях режим устанавливают по критерию  $Ar$ . Затем совместно решают (3.1) и (3.3) для нахождения критерия  $Re$ , а по нему - скорости осаждения.

При использовании формулы (3.2) предварительное знание режима осаждения частиц не требуется.

Твердые частицы нешарообразной формы испытывают большее сопротивление со стороны среды при своем движении и приобретают меньшую скорость осаждения по сравнению с рассчитанной по формулам (3.1,3.2):

$$w_{\text{ч}} = \psi \cdot w, \text{ м/с},$$

где  $w$  – скорость осаждения шарообразной частицы равновеликой массы, м/с;  $\psi$  – коэффициент формы, ( $\psi < 1$ ).

Коэффициент формы частицы характеризует степень ее отклонения от формы шара (сферы) и определяется по формуле

$$\psi = F / F_{\text{ч}},$$

где  $F$  – поверхность частицы шарообразной формы равновеликой массы;  $F_{\text{ч}}$  – поверхность данной частицы.

Поскольку поверхность частицы нешарообразной формы определить трудно, то в реальных условиях коэффициент формы оценивают по формуле:

$$\psi = w_{\text{ч}} / w. \quad (3.4)$$

При этом  $w_{\text{ч}}$  - определяют экспериментально, а  $w$  - находят расчетом по формулам (3.1,3.2).

Анализ формул для вычисления скорости осаждения частиц показывает, что она тем больше, чем больше диаметр частицы и разности плотностей частицы и среды и чем меньше вязкость среды. Для увеличения эффективности процесса разделения на практике воздействуют на основные факторы, повышающие скорость осаждения. Так, повышая температуру среды, уменьшают ее плотность и вязкость. Используют также добавление поверхностно-активных веществ, снижающих вязкость, межфазное натяжение для эмульсий. В ряде случаев воздействуют на диаметр осаждающихся частиц путем добавления коагулянтов, наложения сил электрического поля высокого напряжения, которые приводят к укрупнению дисперсных частиц и увеличению скорости их осаждения.

Найденную скорость осаждения частиц  $w_{\text{ос}}$  используют для практических расчетов по уравнению

$$V_{\text{осв}} = F \cdot w_{\text{ос}}, \quad (3.5)$$

где  $V_{\text{осв}}$  – производительность отстойника по осветленной среде, м<sup>3</sup>/с;  $F$  – площадь отстаивания, м<sup>2</sup>.

При заданной производительности аппарата по формуле (3.5) рассчитывают его размеры или, наоборот, по заданным размерам – производительность.

Для управления работой промышленного отстойника необходимо иметь информацию о расходе разделяемой системы, величинах давления и температуры в аппарате, положении линии раздела фаз, качестве разделения. Эти данные получают на основе показаний соответствующих контрольно-измерительных приборов.

### **Аппаратура и материалы**

При выполнении опытной части работы используются:

- комплект цилиндров для изучения процесса отстаивания;
- образец суспензии;
- комплект твердых частиц;
- лабораторные весы;
- секундомер;
- измерительная линейка;
- термометр.

### **Указания по технике безопасности**

Для безопасного проведения опытной части работы необходимо:

- проводить работу только в присутствии лаборанта;
- выполнять работу в строгом соответствии с методическими указаниями;
- соблюдать меры предосторожности в обращении со стеклянной посудой.

### **Методика и порядок выполнения работы**

В первой части работы определяют скорость осаждения твердых частиц.

Определение скорости осаждения частиц осуществляют в цилиндрах, заполненных жидкостью различной вязкости (глицерин, вода и др.). В качестве частиц используют гранулы силикагеля, алюмогеля и других зернистых материалов. Для каждой среды отбирают по три

частицы разного размера и предварительно взвешивают. Записывают температуру окружающей среды. Измеряют расстояние между метками на цилиндрах  $H$  - высоту осаждения (см. рисунок 3.1, а). Время осаждения частицы на пути  $H$  - измеряют при помощи секундомера. Результаты измерений заносят в протокол работы.

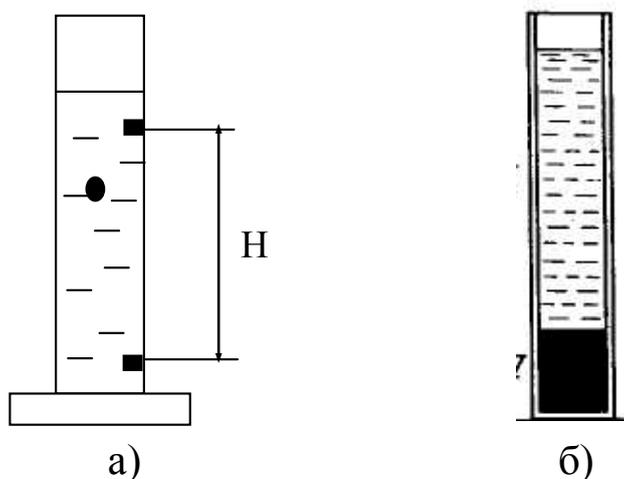


Рисунок 3.1 - Схема проведения опыта: а – для одиночной частицы; б – для консолидированного осаждения.

Во второй части работы проводят визуальное наблюдение за процессом разделения суспензии в статическом отстойнике периодического действия и определяют среднюю скорость осаждения полидисперсных твердых частиц (см. рисунок 3.1, б).

В качестве модели отстойника используют стеклянный мерный цилиндр, а в качестве суспензии – взвесь частиц мела в воде.

По указанию преподавателя готовят образец суспензии и вливают его в цилиндр. Одновременно включают секундомер и наблюдают за процессом отстаивания в течение не менее получаса. Высоту осветленной жидкости в цилиндре замеряют, а результаты измерений заносят в протокол работы.

По окончании опыта аппаратуру приводят в порядок.

### **Оформление отчета**

В отчёте о выполненной работе должны содержаться следующие данные.

Дата проведения работы.

Цель работы.

Результаты измерений и справочные данные к расчетам.

Обработка опытных данных.

Выводы по работе.

Обработку опытных данных проводят в следующем порядке.

1. Опытное значение скорости осаждения одиночной частицы определяют по формуле

$$w_{\text{ч}} = H / \tau, \text{ м / с.}$$

2. Скорость шарообразной частицы равновеликой массы рассчитывают по формуле (3.1). При этом диаметр частицы  $d_{\text{ЭКВ}}$  предварительно вычисляют по формуле

$$d_{\text{ЭКВ}} = 1,24 \cdot \sqrt[3]{G_{\text{ч}} / \rho_{\text{ч}}},$$

где  $G_{\text{ч}}$  - масса частицы, кг;  $\rho_{\text{ч}}$  - плотность частицы, кг / м<sup>3</sup>.

2. Свойства частиц и сред принимают по справочным данным.

3. Коэффициент формы частицы оценивают по формуле (3.4).

4. Результаты измерений и расчетов оформляют в виде таблицы (см. ниже).

5. Среднюю скорость осаждения полидисперсных твердых частиц определяют, как и в предыдущем случае

$$w_{\text{ос}} = H / \tau, \text{ м / с.}$$

6. По указанию преподавателя рассчитывают габаритные размеры отстойника на заданную производительность, используя формулу (3.5).

Таблица 3.1 - Результаты измерений и расчетов

№ частицы	Масса частицы $G_{\text{ч}}$ , кг	Время осаждения $\tau$ , с	Скорость осаждения $w_{\text{ч}}$ , м/с	Диаметр частицы $d_{\text{ЭКВ}}$ , м	Ar	Re	Скорость осаждения $w$ , м/с	Коэффициент формы $\psi$
1								
2								
...								

## Контрольные вопросы

1. В каких процессах используется принцип осаждения (отстаивания)?
2. Что является движущей силой при отстаивании эмульсий и суспензий?
3. Что понимают под скоростью осаждения диспергированных частиц в сплошной среде?
4. Какие условия осаждения считаются свободными? Приведите примеры.
5. Какие условия осаждения считаются стесненными? Приведите примеры.
6. Как рассчитывают скорость осаждения частиц?
7. Что характеризует коэффициент гидродинамического сопротивления?
8. Как увеличить скорость осаждения частиц?
9. Что понимают под коэффициентом формы частицы?
10. Какое экологическое значение имеет процесс отстаивания?
11. Какие параметры работы промышленных отстойников подлежат контролю?

## ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЦЕНТРИФУГИ

**Цель и содержание работы.** Целью работы является практическое ознакомление с устройством и работой лабораторной центрифуги. Содержанием работы является экспериментальное определение продолжительности центрифугирования при разделении суспензии.

### Теоретическое обоснование

Под центрифугированием понимают процесс разделения жидких неоднородных систем (суспензий и эмульсий) в поле центробежных сил с использованием сплошных или проницаемых для жидкости перегородок. Процесс осуществляют в машинах, называемых центрифугами. Основными характеристиками центрифуг являются центробежный фактор разделения и индекс производительности. Фактор разделения показывает соотношение центробежной силы и силы тяжести, действующих на осаждающуюся частицу

$$k_p = C / G \approx r \cdot n^2 / 900,$$

где  $C$ ,  $G$  – центробежная сила и сила тяжести, Н;  $r$  – радиус вращения частицы, м;  $n$  – число оборотов ротора центрифуги,  $\text{мин}^{-1}$ .

Индекс производительности центрифуги характеризует ее эффективную площадь поверхности осаждения и рассчитывается по формуле

$$\Sigma = F \cdot k_p^z, \quad (4.1)$$

где  $F$  – площадь поверхности осаждения в роторе,  $\text{м}^2$ ;  $z$  – показатель, зависящий от режима осаждения частиц:

при ламинарном режиме	$Re \leq 0,2$	$z = 1;$
при переходном режиме	$0,2 < Re \leq 500$	$z = 0,715;$
при турбулентном режиме	$Re > 500$	$z = 0,5;$

$Re$  – критерий подобия Рейнольдса.

Действительную производительность центрифуги рассчитывают по формуле

$$V_d = \xi \cdot V_T,$$

где  $V_T$  - теоретическая производительность центрифуги,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\xi$  - коэффициент эффективности центрифуги, зависящий от ее конструкции ( $\xi < 1$ ).

Теоретическую производительность центрифуги рассчитывают в зависимости от принципа разделения. Для отстойных центрифуг используют формулу

$$V_T = w_{oc} \cdot \Sigma,$$

где  $w_{oc}$  - скорость осаждения частиц под действием силы тяжести,  $\text{м}/\text{с}$ .

Скорость осаждения частиц при их концентрации в суспензии  $X_{CM} \leq 4\%$  объ. рассчитывают из критериального уравнения осаждения в свободных условиях

$$\varphi \cdot Re^2 = 4/3 Ar, \quad (4.2)$$

где  $\varphi$  - коэффициент гидродинамического сопротивления;  $Re$ ,  $Ar$  - критерии подобия Рейнольдса и Архимеда.

При  $X_{CM} > 4\%$  объ. используют формулу для стесненных условий осаждения

$$Re_{ст} = \frac{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,6 \cdot \sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}}, \quad (4.3)$$

где  $\varepsilon$  - доля объёма жидкой фазы в суспензии  $\varepsilon = v_{ж} / (v_{ж} + v_{тв})$ ;  $v_{ж}$ ,  $v_{тв}$  - объёмы жидкой и твёрдой фаз суспензии,  $\text{м}^3$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ).

Расчёт  $V_T$  центрифуг других типов см. в литературе [1 - 4].

Для управления работой промышленной центрифуги необходимо иметь информацию о расходе разделяемой системы, величинах давления и температуры в роторе машины, о качестве разделения, о температуре подшипников и функционировании смазки, числе оборотов ротора и уровне вибраций. Эти данные получают на основе показаний соответствующих контрольно-измерительных приборов.

### Аппаратура и материалы

При выполнении опытной части работы используются:

- лабораторная настольная центрифуга типа ЦЛН-2;
- комплект пробирок и образец суспензии;

- лабораторные весы, секундомер, термометр.

### **Указания по технике безопасности**

Для безопасного проведения опытной части работы необходимо:

- проводить работу только в присутствии лаборанта;
- выполнять работу в строгом соответствии с методическими указаниями и паспортом центрифуги;
- соблюдать меры предосторожности в обращении со стеклянной посудой.

### **Методика и порядок выполнения работы**

Центрифуга работает по принципу отстаивания и предназначена для разделения суспензий и некоторых эмульсий. Общий вид машины представлен на рисунке 4.1.

Рабочим узлом центрифуги является ротор (коническая головка), насаженный на вертикальный вал электродвигателя. В головке имеются наклонные сверления, в которые устанавливаются пробирки с разделяемой неоднородной системой. Перед включением ротор центрифуги должен быть закрыт крышкой и кожухом. Эксплуатация центрифуги осуществляется в соответствии с инструкцией.

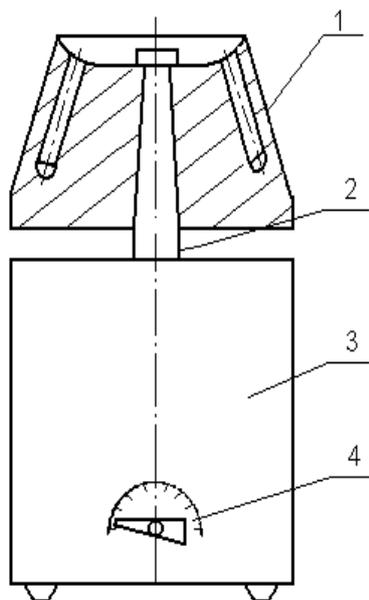


Рисунок 4.1 – Общий вид центрифуги: 1 – ротор; 2 – вал электродвигателя; 3 – корпус; 4 – переключатель числа оборотов.

В качестве разделяемой неоднородной системы используется суспензия из частиц мела в воде. Опыту предшествуют процедура приготовления образца для разделения и расчет продолжительности центрифугирования.

Взвешивают две навески мелко истолченного мела по  $G_{ТВ} = 0,1 - 0,2$  г и помещают в две пробирки. Затем в пробирки добавляют по 7 - 8 мл дистиллированной воды и тщательно взбалтывают. Суспензия готова для центрифугирования.

Расчет продолжительности центрифугирования выполняют следующим образом. Определяют концентрацию твердой фазы в суспензии:

$$X_{см} = G_{ТВ} / (G_{ТВ} + G),$$

где  $G = v \cdot \rho$  – масса жидкой фазы суспензии, кг;  $v$  – объём добавленной в пробирку жидкости,  $м^3$ ;  $\rho$  – плотность жидкости,  $кг/м^3$ .

Задаются концентрациями твердой фазы в осветлённой среде (фугате)  $X_{осв}$  и в осадке  $X_{ос}$  после центрифугирования и рассчитывают производительность центрифуги (для одной пробирки)

$$V_{д} = V_{осв} = \frac{G_{осв}}{\rho_{осв}} = \frac{G_{ТВ} + G}{\rho_{осв}} \cdot \frac{X_{ос} - X_{см}}{X_{ос} - X_{осв}}, м^3,$$

где  $V_{осв}$  – объём осветленной жидкости,  $м^3$ ;  $G_{осв}$  – масса осветленной жидкости, кг;  $\rho_{осв}$  – плотность осветленной жидкости,  $кг/м^3$ .

При малой концентрации частиц  $\rho_{осв} \approx \rho$ . Плотность жидкости и другие ее свойства, плотность твердой фазы, необходимые в последующих расчетах, принимают по справочным данным.

Теоретическая производительность центрифуги

$$V_{т} = V_{д} / \xi,$$

где  $\xi$  – принимается по указанию преподавателя.

Рассчитывают критерий Архимеда

$$Ar = \frac{d_{мин}^3 \cdot (\rho_{ТВ} - \rho) \cdot g}{v^2 \cdot \rho},$$

где  $d_{мин}$  – минимальный диаметр частиц, м (принимают по указанию преподавателя);  $g = 9,81$   $м/с^2$  – ускорение силы тяжести;

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Устанавливают режим осаждения частиц под действием силы тяжести: при  $Ar \leq 3,6$  – ламинарный; при  $3,6 < Ar \leq 84000$  – переходный; при  $Ar > 84000$  – турбулентный.

В зависимости от концентрации частиц  $X_{\text{см}}$  рассчитывают критерий Рейнольдса по одному из вышеприведенных уравнений (4.2,4.3). При использовании критериального уравнения осаждения (4.2) учитывают, что  $\varphi = 24 / Re$  – при ламинарном режиме;  $\varphi = 18,5 / Re^{0,6}$  – при переходном режиме;  $\varphi = 0,44$  – при турбулентном режиме.

Скорость осаждения частиц рассчитывается по формуле

$$w_{\text{ос}} = Re \nu / d_{\text{мин}}, \text{ м/с.}$$

Площадь осаждения частиц равна

$$F = \pi d_{\text{вн}}^2 / 4, \text{ м}^2,$$

где  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр пробирки, м.

Фактор разделения

$$k_p = r_{\text{ср}} n^2 / 900,$$

где  $r_{\text{ср}} = 0,058$  м - средний радиус вращения для данной центрифуги;  $n$  - принимают по указанию преподавателя.

Индекс производительности определяют по формуле (4.1).

Продолжительность центрифугирования равна

$$\tau = V_T / (w_{\text{ос}} \Sigma), \text{ с.}$$

После выполнения описанных расчетов готовят пробирки с суспензией, устанавливают их в ротор, закрывают крышку ротора и кожух центрифуги, затем включают центрифугу на необходимое число оборотов и пускают секундомер. По истечении установленной продолжительности центрифугирования машину и секундомер выключают. После остановки вынимают пробирки и визуально контролируют качество разделения суспензии. Опыт считается законченным, машину приводят в порядок.

### Оформление отчета

В отчете о выполнении работы должны содержаться следующие данные.

Дата проведения работы.

Цель работы.

Схема центрифуги.

Исходные данные для проведения опыта и результаты расчета продолжительности центрифугирования.

Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Что понимают под центрифугированием?
2. Что является движущей силой процесса центрифугирования?
3. Что характеризует фактор разделения и от чего он зависит?
4. Что характеризует индекс производительности центрифуги?
5. Как определяют индекс производительности центрифуги?
6. В чём отличие конструкции ротора фильтрующей центрифуги от осадительной?
7. Какие системы разделяют в центробежных сепараторах?
8. Какими способами, кроме центрифугирования, можно разделить суспензии и эмульсии?
9. Какие параметры работы промышленных центрифуг подлежат контролю?

## ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЦИКЛОНА

**Цель и содержание работы.** Целью работы является визуальное наблюдение за процессом очистки газа в циклоне. Содержание работы заключается в приобретении навыков по опытному определению эффективности и коэффициента гидравлического сопротивления циклона.

### Теоретическое обоснование

В ряде процессов химической технологии возникает проблема очистки газов и паров от твердых взвешенных частиц. Образование неоднородных дисперсных систем (пылей, дымов) происходит при измельчении твердых материалов в результате дробления, транспортирования, при проведении контактно-каталитических процессов (сушки, обжига, адсорбции, крекинга, риформинга). Очистку промышленных газов от твердых частиц проводят с целью улавливания ценных веществ (катализаторы, адсорбенты) или отходов производства (сажа) при выбросе газов в атмосферу.

В данной работе изучаются вопросы очистки газов от твердых частиц при помощи циклонного процесса и практического испытания модели циклона.

Разделение неоднородных систем типа пылей и дымов может осуществляться следующим образом: фильтрованием; мокрой очисткой в скрубберах; осаждением под действием силы тяжести, центробежных, инерционных или электростатических сил.

При выборе метода очистки газа необходимо учитывать его свойства, концентрацию твердой фазы, ее плотность и фракционный состав, производительность и желаемую степень очистки, параметры процесса. Циклонную очистку обычно применяют для газов с концентрацией твердой фазы не более  $0,4 \text{ кг/м}^3$  и размером частиц свыше  $5 \text{ мкм}$  (в аппаратах с псевдоожиженным слоем твердых частиц концентрация несколько выше). Циклонный процесс относится к типу гидромеханических и является разновидностью осаждения под дей-

ствием центробежных сил. Осаждение твердых частиц в циклоне происходит следующим образом. Газ, подлежащий очистке, вводится в циклон (см. рисунок 5.1) тангенциально со скоростью 10 - 25 м/с.

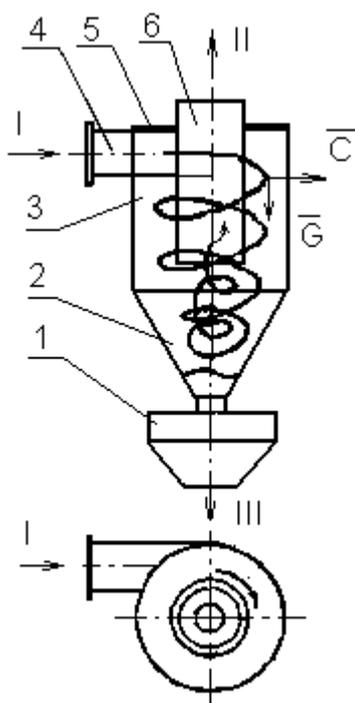


Рисунок 5.1 – Схема циклона: 1 – бункер; 2 – коническое днище; 3 – цилиндрический корпус; 4 – входной патрубок; 5 – крышка; 6 – выхлопная труба; I – неоднородная система; II – очищенный газ; III – уловленные твердые частицы.

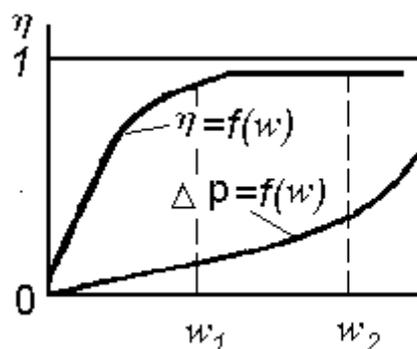


Рисунок 5.2 - Зависимости степени очистки и перепада давления в циклоне от скорости потока:  $w_1$ ,  $w_2$  – оптимальный интервал скоростей потока ( $w_{\text{усл}}=2,5 - 4$  м/с).

В цилиндрической части аппарата поток совершает 1,5 - 2,5 оборота, двигаясь вниз по периферии, и несколько витков в центральной части при движении вверх к выхлопной трубе.

На твердые частицы, движущиеся по криволинейной траектории во вращающемся потоке, действуют центробежные силы.

Под действием этих сил частицы перемещаются к стенкам циклона, а достигнув их, ссыпаются в бункер, откуда периодически выводятся. Очищенный газ непрерывно выводится из циклона вверх через выхлопную трубу.

Степень очистки газа в циклоне оценивается величиной

$$\eta = \frac{G_y}{G_{\Pi}} = \frac{C_1 - C_2}{C_1}, \quad (5.1)$$

где  $G_{\Pi}$ ,  $G_y$  – масса твердой фазы, поступившей в циклон и уловлен-

ной в циклоне, кг;  $C_1, C_2$  – концентрация твердой фазы во входном и выходном потоках в циклоне, кг/м<sup>3</sup>.

Степень очистки газа в циклоне зависит от соотношения сил, действующих на твердые частицы, и, в первую очередь, от соотношения сил тяжести ( $G$ ) и центробежных ( $C$ ):

$$k_p = \frac{m \cdot w^2}{r \cdot m \cdot g}, \quad (5.2)$$

где  $m$  – масса частицы, кг;  $r$  – радиус вращения частицы, м;  $w$  – скорость вращения частицы, м/с;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

Величину  $k_p$  называют центробежным фактором разделения, который показывает, во сколько раз центробежная сила, действующая на частицу, превышает силу тяжести. Чем выше  $k_p$ , тем эффективнее работает циклон. Степень очистки газа в циклоне зависит также от конструкции основных элементов и соотношения геометрических размеров.

В циклоне любой конструкции степень очистки сначала повышается с ростом скорости потока, а затем остается практически постоянной (рисунок 5.2). При дальнейшем росте скорости потока частицы захватываются вторичной (центральной) спиралью и выносятся через выхлопную трубу. Эффективность работы циклона при этом снижается.

Гидравлическое сопротивление циклона  $\Delta p$  складывается из потерь давления на трение и на местных сопротивлениях, обусловленных изменением направления и скорости потока. Характер зависимости перепада давления в циклоне от скорости потока приведен на рисунке 5.2.

Для облегчения расчётов величины  $\Delta p$  все виды сопротивлений в циклоне объединяют одним коэффициентом  $\xi$ , а вместо действительных скоростей потока на отдельных участках принимают некоторую фиктивную, условную скорость. Под условной скоростью потока в циклоне понимают такую, с которой поток перемещался бы вертикально через цилиндрическую часть корпуса (с внутренним диаметром  $D$ ). Тогда потери давления в циклоне можно подсчитать по фор-

муле (в Па).

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{\rho \cdot w_{\text{усл}}^2}{2}, \quad (5.3)$$

где  $\rho$  – плотность потока, кг/м<sup>3</sup>,  $w_{\text{усл}}$  – условная скорость потока, м/с.

Для различных типов циклонов  $\xi = 65 - 2000$ ,  $\Delta p$  – до 1500 Па.

На практике было установлено, что высокая степень очистки ( $\eta = 85 - 90\%$ ) соответствует оптимальным значениям  $w_{\text{усл}} = 2,5 - 4$  м/с. При меньших скоростях степень очистки резко уменьшается, а при больших имеет место перерасход энергии на продвижение потока через циклон (быстрый рост  $\Delta p$ ) почти без увеличения  $\eta$ .

На эффективность работы циклонов оказывает влияние и скорость потока во входном патрубке. Оптимальной считается скорость  $w_{\text{вх}} = 10 - 25$  м/с. При меньших значениях  $w_{\text{вх}}$  возможно выпадение твердых частиц во входном патрубке, а при больших - снижение эффективности, значительный рост потерь напора и повышенный эрозийный износ.

Анализ формулы (5.2) показывает, что фактор разделения в циклоне может быть увеличен за счёт повышения скорости потока  $w$  или за счёт уменьшения его радиуса  $r$ . Способ интенсификации работы циклонов за счёт уменьшения их диаметра был реализован в групповых (работающих параллельно) и батарейных циклонах (мультициклонах). Мультициклон состоит из 25 - 160 параллельно работающих циклонных элементов, объединенных в одном корпусе. Диаметр элементов составляет 100, 150 или 250 мм. Циклонные элементы имеют спиральные направляющие устройства, закручивающие поток, поступающий сверху из распределительной камеры. Твердые частицысыпаются из элементов в общий бункер внизу аппарата, откуда выводятся наружу. Очищенный газ поднимается по выхлопным трубам элементов в сборную камеру и выводится из корпуса циклона через верхний штуцер.

Применение групповых и батарейных циклонов было вызвано необходимостью очистки больших количеств газа.

Использование циклонов, в аппаратах с псевдоожиженным слоем

мелкозернистого катализатора и адсорбента для улавливания твердых частиц имеет некоторые отличительные особенности. Концентрация твердой фазы в потоке в этих циклонах достигает 0,6 - 4,8 кг/м<sup>3</sup> (в зависимости от характера псевдооживления и фракционного состава зернистого материала). Циклоны работают в условиях высоких температур (400 - 600°С) и повышенного эрозионного износа. С учетом перечисленных факторов для улавливания твердых частиц в аппаратах с псевдооживленным слоем применяют одиночные циклоны, соединенные последовательно в несколько ступеней. Для грубой сепарации частиц (1-я ступень) используют циклоны диаметром до 2400 мм, а для последующих ступеней (2-я, 3-я) - диаметром 900 - 1800 мм.

Для защиты циклонов от эрозии их защищают изнутри слоем жаропрочного бетона. В рассматриваемых типах циклонов удаляемые частицы возвращаются в слой по стояку. Для исключения прохода газа из аппарата в циклон по стояку в последнем поддерживается определенный уровень твердого материала, выполняющего роль "гидрозатвора". Для поддержания постоянного уровня частиц в стояке его погружают на определенную глубину в псевдооживленный слой или оборудуют специальным запорным устройством. Устройство открывается при достижении определенной высоты столба материала в стояке.

В промышленности используют различные конструкции циклонов. Наиболее часто применяют аппараты следующих типов: НИИО-газ (Научно-исследовательского института по санитарной и промышленной очистке газов), ЛИОТ (Ленинградского института охраны труда ВЦСПС), СИОТ (Свердловского института охраны труда ВЦСПС). Подбор необходимого типоразмера циклона осуществляется по нормам и каталогам.

Для управления работой промышленного циклона необходимо иметь информацию о расходе разделяемой системы, величинах перепада давления и температуры в аппарате, качестве очистки газа. Эти данные получают на основе показаний соответствующих контрольно-измерительных приборов.

## **Аппаратура и материалы**

При выполнении опытной части работы используются:

- опытная установка для реализации циклонной очистки газа;
- образец сыпучего материала;
- воздух от сети;
- секундомер;
- лабораторные весы.

### **Указания по технике безопасности**

Для безопасного проведения лабораторной работы необходимо:

- проводить работу только в присутствии лаборанта;
- не превышать расходы воздуха через циклон сверх рекомендованных преподавателем;
- выполнять работу в строгом соответствии с методическими указаниями.

### **Методика и порядок выполнения работы**

Схема лабораторной установки для изучения работы циклона представлена на рисунке 5.3 и включает циклон с приемником, бункер-питатель с напорным стояком, линию подачи воздуха, ротаметр, манометр.

Для создания дисперсного потока определенной концентрации в линию подачи воздуха из питателя 3 через напорный стояк вводится порошковый материал. Поток поступает в циклон 5, где происходит отделение частиц от воздуха. Очищенный воздух выводится в атмосферу через выхлопную трубу, а материал высыпается в приемник 6. Количество подаваемого воздуха регулируется вентилем 1 и измеряется ротаметром 2. Дозировка материала осуществляется регулированием величины зазора для его прохода в напорный стояк. Это достигается подъёмом запорного конуса в бункере на различную (заранее заданную) высоту. Запорный конус связан штоком со стальным сердечником электромагнита 4, катушка которого подключена через выключатель 8 к источнику тока. Величина хода сердечника в катушке

(вверх) регулируется с помощью специального ограничителя (винта). Перепад давления в циклоне измеряется U-образным манометром 7.

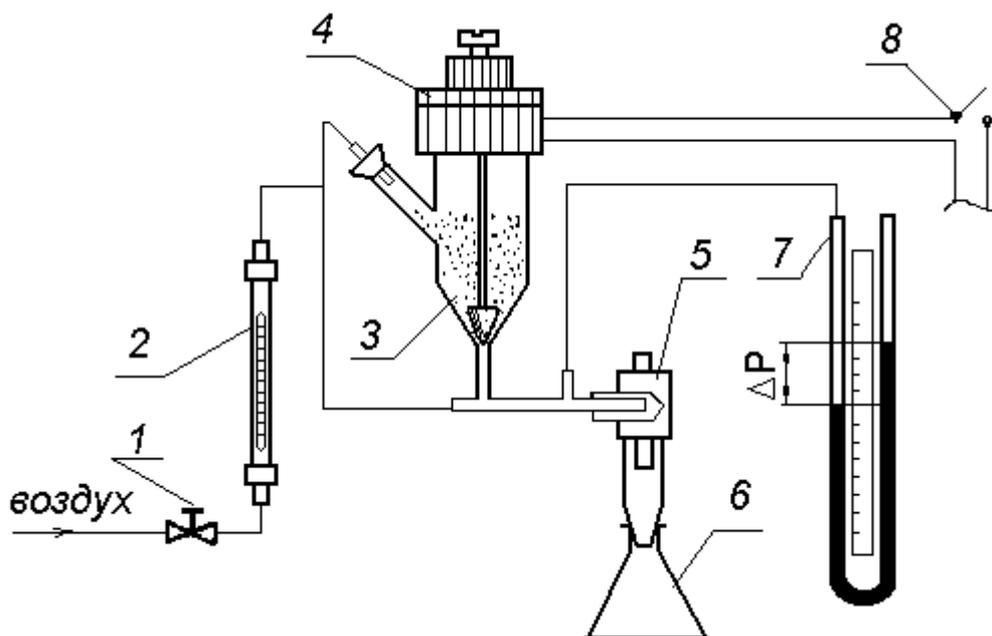


Рисунок 5.3 – Схема лабораторной установки: 1 – вентиль; 2 – ротаметр; 3 – бункер–питатель; 4 – электромагнит; 5 – циклон; 6 – приёмник; 7– U–образный манометр; 8 – выключатель.

Работа может выполняться по двум вариантам. По первому варианту ( $C_1 = \text{const}$ ) определяется степень очистки газа  $\eta$  и сопротивление циклона  $\Delta P$  при различных скоростях газового потока ( $w_{\text{усл}}$ ). На основании полученных экспериментальных данных строятся графические зависимости  $\eta = f_1(w_{\text{усл}})$  и  $\Delta p = f_2(w_{\text{усл}})$  при  $C_1 = \text{const}$ , позволяющие выявить влияние скорости потока на степень очистки и гидравлическое сопротивление циклона.

По второму варианту определяется степень очистки газа  $\eta$  и сопротивление циклона  $\Delta p$  при различных начальных концентрациях твердой фазы в потоке  $C_1$  и постоянной заданной скорости потока. На основании этих данных строятся графические зависимости  $\eta = \varphi(C_1)$  при  $w_{\text{усл}} = \text{const}$ , которые позволяют выявить влияние начальной концентрации частиц в циклоне на степень очистки и гидравлическое сопротивление циклона.

Опыты проводят в следующем порядке.

Взвешивают навеску материала  $G_{\text{п}}$  и загружает в питатель при

опущенном запорном конусе (выключатель 8 - разомкнут).

Открытием вентиля 2 устанавливают заданный расход воздуха  $V$  через циклон и с помощью ротаметра его измеряют.

Перепад давления в циклоне измеряют манометром. Затем замыкают цепь соленоида и одновременно включают секундомер. При этом запорный конус поднимается, обеспечивая проход материала в напорный стояк и далее - в воздушную линию. Дисперсный поток поступает в циклон на разделение. В течение опыта поддерживают постоянный расход воздуха и замеряют перепад давления в циклоне. Опыт прекращают тогда, когда полностью израсходуется материал в питателе, в этот момент выключают секундомер. По окончании опыта определяют массу уловленного в приёмнике материала  $G_y$ . Все данные заносят в протокол наблюдений.

Далее проводят 3 - 4 опыта при соответствующем изменении параметров: по первому варианту изменяется расход воздуха, при этом концентрация частиц в потоке должна выдерживаться постоянной; по второму варианту изменяется концентрация частиц в потоке путем изменения высоты подъёма запорного конуса при постоянном расходе воздуха. Все опытные данные заносят в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 - Результаты измерений

№ опыта	Кол-во загруж. материала $G_n$ , кг	Показания ротаметра	Расход воздуха $V$ , м <sup>3</sup> /с	Перепад давления в циклоне $\Delta p$		Время опыта $\tau$ , с	Кол-во уловленного материала $G_y$ , кг
				мм вод ст	Па		
Вариант 1: 3 - 4 опыта							
Вариант 2: 3 - 4 опыта							

Обработку опытных данных проводят в следующем порядке.

Определяют расход воздуха за время опыта (кг)

$$G = V \cdot \rho \cdot \tau,$$

где  $V$  – объёмный расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $\rho$  – плотность воздуха при условиях опыта, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время опыта, с.

Плотность воздуха вычисляется по формуле:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{\pi}{\pi_0} \cdot \frac{T}{T_0},$$

где  $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха при  $T_0 = 273,15 \text{ К}$ ;  $\pi_0 = 760 \text{ мм рт ст} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $\pi$  – давление воздуха перед ротаметром, Па;  $T$  – температура воздуха перед ротаметром, К.

Если пренебречь потерей давления в ротаметре, то

$$\pi = \pi_{\text{БАР}} + \Delta p_{\text{Ц}},$$

где  $\pi_{\text{БАР}}$  – атмосферное давление, Па;  $\Delta p_{\text{Ц}}$  – перепад давления в циклоне, Па.

Средние за время опыта массовые концентрации материала в потоке до и после очистки рассчитывают по формулам (кг / кг)

$$C_1 = \frac{G_{\text{П}}}{G}, \quad C_2 = \frac{G_{\text{П}} - G_{\text{У}}}{G}.$$

Эффективность циклона (степень очистки газа) рассчитывают по формуле (5.1).

Скорость воздуха во входном патрубке циклона равна (м/с)

$$w_{\text{ВХ}} = \frac{V}{F},$$

где  $F = b \times h$  – (или  $=\pi d_{\text{ВХ}}^2/4$ ) площадь поперечного сечения входного патрубка,  $\text{м}^2$ ;  $b, h$  – ширина и высота патрубка, м;  $d_{\text{ВХ}}$  – диаметр входного патрубка.

Условная средняя скорость газа в циклоне равна (м/с)

$$w_{\text{УСЛ}} = \frac{V}{S},$$

где  $S = \pi D^2/4$  – поперечное сечение циклона в цилиндрической части,  $\text{м}^2$ ;  $D$  – внутренний диаметр корпуса циклона, м;  $\pi = 3,14$ .

Коэффициент сопротивления циклона определяется по формуле

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta p_{\text{Ц}}}{w_{\text{УСЛ}}^2 \cdot \rho}.$$

Все расчётные данные по каждому опыту заносят в таблицу 5.2 и по этим данным строят графические зависимости, позволяющие оце-

нить влияние скорости потока или концентрации твердых частиц на степень очистки газа и гидравлическое сопротивление циклона.

### Оформление отчёта

В отчёте о выполненной работе должны содержаться следующие данные.

Дата проведения работы.

Цель работы.

Схема лабораторной установки.

Температура опыта, °С.

Барометрическое давление, Па.

Наименование и характеристика материала.

Характеристика циклона (размеры), м.

Результаты измерений (см. таблица 5.1).

Результаты расчётов (см. таблица 5.2).

Графические зависимости:

для первого варианта:  $\eta = f_1(w_{\text{усл}})$  и  $\Delta p_{\text{ц}} = f_2(w_{\text{усл}})$  при  $C_1 = \text{const}$ ;

для второго варианта:  $\eta = \varphi_1(C_1)$  и  $\Delta p_{\text{ц}} = \varphi_2(C_1)$  при  $w_{\text{усл}} = \text{const}$ .

Выводы по работе.

Таблица 5.2 - Результаты расчётов

№	Плотность воздуха $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Расход воздуха $G$ , кг	Концентрация материала в потоке		Степень очистки газа, $\eta$	Скорость воздуха в циклоне, м/с		Коэффициент гидравлического сопротивления, $\xi$
			до циклона, $C_1$	после циклона, $C_2$		Во входном патрубке, $w_{\text{вх}}$	Условная, $w_{\text{вх}}$	

### Контрольные вопросы

1. Какие методы очистки неоднородных газовых систем известны?
2. Какие разновидности циклонов используются на практике?

3. Каковы принципы очистки газов в циклонах?
4. Какими показателями характеризуют работу циклона и от каких факторов они зависят?
5. Что понимают под условной скоростью газа в циклоне, и в каких пределах она рекомендуется?
6. Что понимают под эффективностью работы циклона, и в каких пределах она находится?
7. Какие технические решения возможны для повышения степени очистки газов от твердых взвесей?
8. Какие параметры работы промышленных циклонов подлежат контролю?

## ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

**Цель и содержание работы.** Целью работы является изучение устройства и работы теплообменного аппарата типа “труба в трубе”. Содержание работы заключается в определении коэффициента теплопередачи в данном аппарате опытным путём.

### Теоретическое обоснование

Перенос энергии в форме тепла, происходящий между телами (веществами), имеющими различную температуру, называется теплообменом. Вещества, участвующие в теплообмене, называются теплоносителями. Вещество с более высокой температурой, которое в процессе теплообмена отдаёт тепло, - горячий теплоноситель. Вещество с более низкой температурой, воспринимающее тепло, - холодный теплоноситель.

Движущей силой тепловых процессов является разность температур между теплоносителями. Аппараты, в которых осуществляются тепловые процессы, называются теплообменными. В химической и других отраслях промышленности наибольшее распространение получили теплообменные аппараты кожухотрубчатые, воздушного охлаждения, погружного типа, пластинчатые, типа “труба в трубе” и др.

Для управления работой промышленного теплообменного аппарата необходимо иметь информацию о температурах обоих теплоносителей на входе и выходе аппарата, величинах перепада давления в потоках теплоносителей. Эти данные получают на основе показаний соответствующих контрольно-измерительных приборов.

В задачу теплового расчёта теплообменного аппарата входит определение величины поверхности теплообмена (теплопередачи) путём совместного решения уравнений теплового баланса и теплопередачи. Основное уравнение теплопередачи, согласно которому количество тепла, передаваемое от горячего теплоносителя к холодному

через разделяющую их стенку, пропорционально поверхности теплообмена, средней разности температур и продолжительности процесса

$$Q = KF\Delta t_{cp} \tau, \quad (6.1)$$

где  $Q$  – количество тепла, Дж;  $K$  – коэффициент теплопередачи, характеризующий скорость переноса теплоты, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $F$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{cp}$  – средняя движущая сила или средняя разность температур между теплоносителями (средний температурный напор), по поверхности теплопередачи, К;  $\tau$  – продолжительность процесса, с.

Для непрерывного процесса теплопередачи

$$Q = KF\Delta t_c, \quad (6.2)$$

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}}, \quad (6.3)$$

где  $Q$  – в Вт.

Согласно уравнению (6.3) для определения поверхности теплопередачи необходимо знать  $Q$ ,  $K$ ,  $\Delta t_{cp}$ .

Тепловую нагрузку  $Q$  находят из уравнения теплового баланса для одного из теплоносителей.

В общем случае тепловой баланс (без учёта потери теплоты в окружающую среду) выглядит следующим образом

$$Q = Q_1 = Q_2 \quad (6.4)$$

или 
$$Q = G_i C_i [t_{iH} - t_{iK}], \quad i=1,2 \quad (6.5)$$

где  $G_i$  – массовый расход  $i$ -го теплоносителя, кг/с;  $C_i$  – удельная теплоёмкость  $i$ -го теплоносителя при его средней температуре, Дж/(кг·К);  $t_{iH}$ ,  $t_{iK}$  – соответственно температура  $i$ -го теплоносителя на входе и выходе из теплообменника.

Движущую силу процесса  $\Delta t_{cp}$  определяют с учетом схемы теплообмена на основе известных температур теплоносителей на входе в аппарат и выходе из него.

Наиболее сложной задачей является определение коэффициента теплопередачи. В данной работе рассматривается вопрос экспериментального определения этого коэффициента.

## Аппаратура и материалы

При выполнении опытной части работы используются:

- опытная установка для изучения работы теплообменного аппарата;
- вода от сети;
- комплект термометров.

### **Указания по технике безопасности**

Для безопасного проведения лабораторной работы необходимо:

- проводить работу только в присутствии лаборанта;
- не превышать расходы воды через теплообменник сверх рекомендованных преподавателем;
- выполнять работу в строгом соответствии с методическими указаниями.

### **Методика и порядок выполнения работы**

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 6.1.

Установка включает модель змеевикового теплообменника типа “труба в трубе”. Устройство промышленных аппаратов этого типа подробно описано в литературе [1 - 4].

По кольцевому пространству аппарата движется горячий теплоноситель (дистиллированная вода), предварительно нагретый в термостате 2. Температура теплоносителя на входе и выходе теплообменника измеряется соответственно термометрами 3 и 4. Подача горячего теплоносителя регулируется при помощи вентиля 5. Пройдя по кольцевому пространству аппарата, он возвращается в термостат 2.

По внутренней трубе теплообменника движется холодный теплоноситель (вода из трубопроводной сети), расход которого регулируется вентилем 6 и измеряется ротаметром 7, а температура его на входе и выходе аппарата соответственно - термометрами 8 и 9. После прохождения теплообменного аппарата холодный теплоноситель сбрасывается в канализацию.

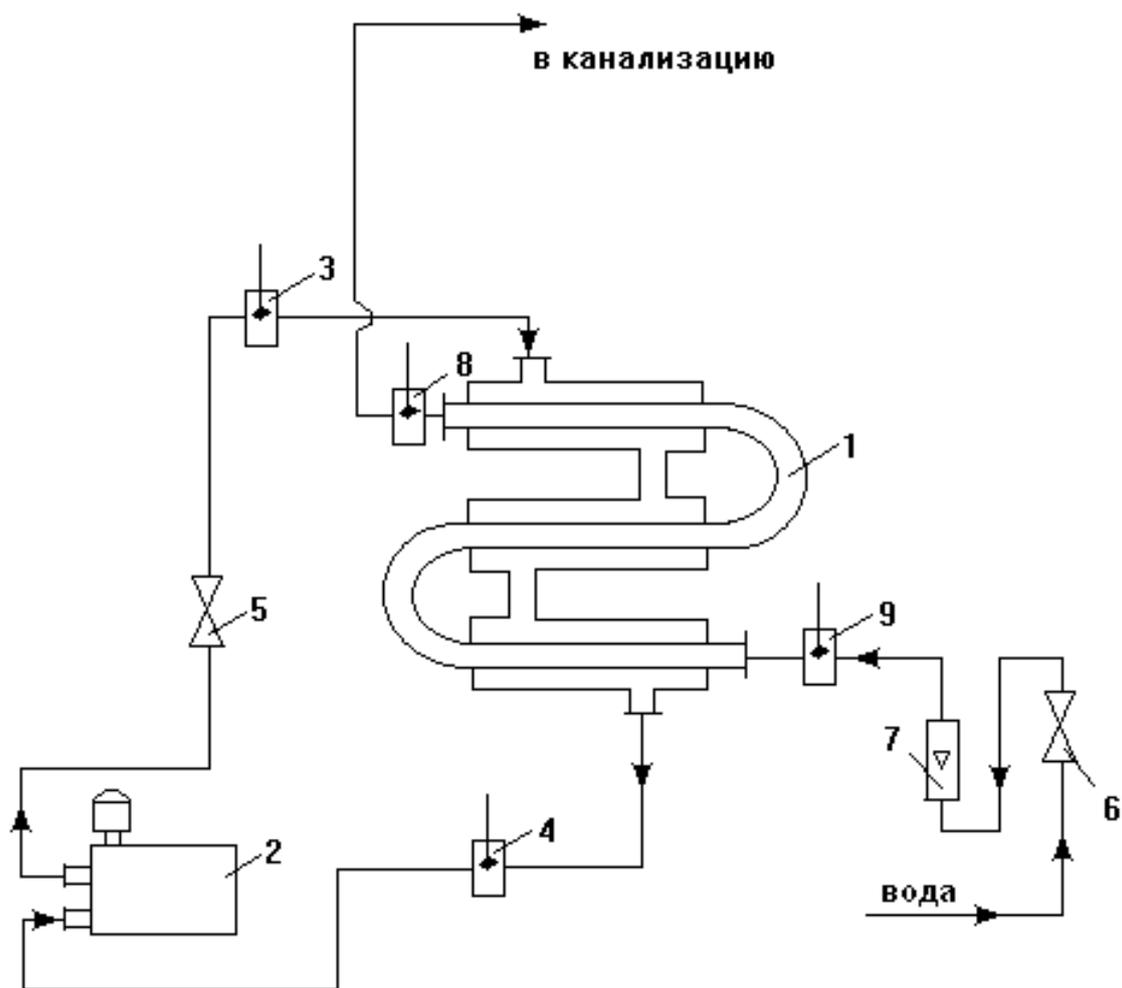


Рисунок 6.1 - Схема экспериментальной установки: 1 – теплообменник; 2 – термостат; 3,4,8,9 – термометры; 5 – вентиль, регулирующий подачу горячего теплоносителя; 6 - вентиль, регулирующий подачу холодного теплоносителя; 7 – ротаметр.

Пускают установку в следующем порядке. Открывают вентиль 6 и устанавливают заданный преподавателем расход холодной воды, ориентируясь по показаниям ротаметра 7. Градуировочная кривая ротаметра имеется в лаборатории. При пуске термостата в работу открывают вентиль 5 и тумблером «насос» включают циркуляцию горячего теплоносителя в системе.

После установления стационарного режима теплообмена (30...60 мин), о чем свидетельствует постоянство во времени температур теплоносителей на выходе из теплообменника, снимают показания всех термометров. Опытные данные заносят в таблицу наблюдений. Замеры проводят не менее 3 раз.

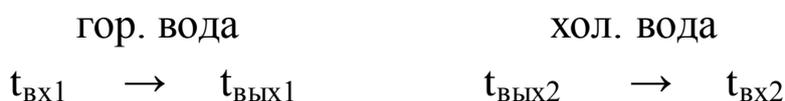
После окончания работы отключают тумблер термостата «режим», через 5...7 минут закрывают вентили 5 и 6 на линиях воды установки. Останавливают насос термостата.

Таблица 6.1 - Результаты измерений

Время от начала опыта $\tau$ , мин	Расход холодной воды		Температура холодного теплоносителя			Температура горячего теплоносителя		
	По ротаметру	$V_2 \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> /с	На входе $t_{вх2}$ , °С	На выходе $t_{вых2}$ , °С	$t_{ср2}$ , °С	На входе $t_{вх1}$ , °С	На выходе $t_{вых1}$ , °С	$t_{ср1}$ , °С

Обработку опытных данных проводят в следующем порядке.

1. При определении коэффициента теплопередачи по опытным данным составляют температурную схему работы теплообменника



Затем определяют разность температур теплоносителей на концах теплообменника

$$\Delta t_{\delta} = t_{вх1} - t_{вых2}; \Delta t_{\text{м}} = t_{вых1} - t_{вх2}$$

и среднюю движущую силу процесса теплообмена

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \text{ если } \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}} > 2 \quad \Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\text{м}}}{2}, \text{ если } \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}} < 2.$$

Для определения физических характеристик теплоносителей рассчитывают их средние температуры.

Для холодной воды (как для теплоносителя, изменяющего свою температуру в узких пределах)

$$t_{\text{ср2}} = \frac{t_{\text{вых2}} + t_{\text{вх2}}}{2},$$

Для горячей воды (как для теплоносителя, изменяющего свою температуру в более широких пределах)

$$t_{\text{ср1}} = t_{\text{ср2}} + \Delta t_{\text{ср}}.$$

**Внимание!** Индекс 1 относится к горячему теплоносителю, проходящему по кольцевому пространству теплообменника, индекс 2 – к холодному теплоносителю, проходящему по внутренней трубе теплообменника.

Рассчитывают массовый расход холодного теплоносителя:

$$G_2 = V_2 \cdot \rho_2,$$

где  $V_2$  - объёмный расход холодного теплоносителя,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\rho_2$  – плотность воды при начальной температуре,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Количество тепла  $Q$ , передаваемого в аппарате от горячей воды к холодной, определяют по формуле (6.5). При этом  $i=2$ .

**Внимание!**  $C_2$  – удельная теплоёмкость воды при температуре  $t_{\text{ср}2}$ ,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , определяют по таблице Приложения.

Находят опытное значение коэффициента теплопередачи  $K_{\text{оп}}$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  по формуле

$$K_{\text{оп}} = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_{\text{ср}}},$$

где  $F = \pi \cdot d_{\text{н}} \cdot l \cdot n$  – площадь поверхности теплообмена,  $\text{м}^2$ . Для используемого аппарата  $d_{\text{н}} = 0,0214$  м – наружный диаметр внутренней трубы,  $l = 0,605$  м – длина трубы одной секции,  $n = 3$  – число секций.

2. Определение расчётного значения коэффициента теплопередачи  $K_{\text{рас}}$  выполняют в следующем порядке.

Рассчитывают коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к наружной поверхности внутренней трубы теплообменника  $\alpha_1$ .

Вычисляют скорость движения жидкости по кольцевому пространству теплообменника  $w_1$ , по формуле (м/с)

$$w_1 = V_1 / f_1,$$

где  $f_1$  – площадь кольцевого пространства теплообменника,  $\text{м}^2$ .

Величина  $f_1$  определяется по выражению  $f_1 = 0,785(D_{\text{в}}^2 - d_{\text{н}}^2)$ , где  $D_{\text{в}} = 0,04$  м – внутренний диаметр наружной трубы;  $V_1$  – объёмный расход горячего теплоносителя, который находится по формуле

$$V_1 = \frac{G_1}{\rho_1},$$

где  $G_1$  – массовый расход горячего теплоносителя, определяемый из уравнений теплового баланса (6.46.,5), кг/с;  $\rho_1$  – плотность горячей воды при её средней температуре, кг/м<sup>3</sup>.

Находят критерий Рейнольдса для потока горячего теплоносителя

$$Re = (w_1 \cdot d_3) / \nu_1,$$

где  $\nu_1$  – коэффициент кинематической вязкости воды при её средней температуре  $t_{cp1}$ , м<sup>2</sup>/с;  $d_3 = D_B - d_H$  – эквивалентный диаметр кольцевого пространства, м.

Определяют по обобщённому критериальному уравнению числовое значение критерия Нуссельта. При ламинарном движении воды ( $Re_1 \leq 2300$ ) по кольцевому пространству теплообменника уравнение теплопередачи имеет вид

$$Nu_1 = 0,17 \cdot Re_1^{0,33} \cdot Pr_1^{0,43} \cdot Gr_1^{0,1} (Pr_1 / Pr_{1ct})^{0,25}. \quad (6.6)$$

При переходном движении ( $2300 \leq Re_1 < 10000$ )

$$Nu_1 = 0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} \cdot (1 - 6 \cdot 10^5 / Re_1^{1,8}). \quad (6.7)$$

При турбулентном движении ( $Re > 10000$ )

$$Nu_1 = 0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} \cdot (Pr / Pr_{1ct})^{0,25}, \quad (6.8)$$

где  $Nu_1$  – критерий Нуссельта;  $Pr_1$  и  $Pr_{1ct}$  – критерии Прандтля при средней температуре воды  $t_{cp1}$  и температуре стенки трубы  $t_{ct1}$  со стороны горячей воды. Величина  $t_{ct}$  предварительно неизвестна и может быть найдена только методом последовательных приближений графически или на ЭВМ.

Критерий Грасгофа определяют по формуле

$$Gr = \frac{g \cdot d_3^3}{\nu^2} \beta \Delta t,$$

где  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения воды при её средней температуре, 1/К (находят по таблице Приложения);  $\Delta t$  – разность температур поверхности стенки  $t_{ct}$  и средней температуры воды  $t_{cp2}$ , К.

На основании рассчитанного значения критерия Нуссельта определяют коэффициент теплоотдачи со стороны горячего теплоносителя  $\alpha_1$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_1 = (Nu_1 \cdot \lambda_1) / d_3, \quad (6.9)$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности воды при её средней температуре  $t_{cp1}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Определяют коэффициент теплоотдачи от поверхности внутренней трубы теплообменника к холодному теплоносителю  $\alpha_2$ .

Вычисляют скорость движения воды по внутренней трубе  $w_2$ , м/с

$$w_2 = V_2/f_2,$$

где  $f_2 = 0,785 d_B^2$  – площадь сечения внутренней трубы, м<sup>2</sup>. Для используемого аппарата  $d_B=0,0154$  м – внутренний диаметр центральной трубы.

Находят критерий Рейнольдса для холодного теплоносителя

$$Re_2 = (w_2 \cdot d_B) / \nu_2,$$

где  $\nu_2$  – коэффициент кинематической вязкости воды при её средней температуре  $t_{cp2}$ , м<sup>2</sup>/с (находят по таблице Приложения).

Определяют по обобщённым критериальным уравнениям (6.6 – 6.8) числовое значение критерия Нуссельта в зависимости от режима движения воды.

**Внимание!** Все параметры, входящие в уравнение, имеют индекс 2;  $t_{ст2}$  – температура стенки трубы со стороны холодной воды, К.

Вычисляют коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности центральной трубы теплообменника к холодному теплоносителю  $\alpha_2$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_2 = (Nu_2 \cdot \lambda_2) / d_B, \quad (6.10)$$

где  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности воды при её средней температуре, Вт/(м<sup>2</sup>·К) (находят по таблице Приложения).

Определяют расчетное значение коэффициента теплопередачи по формуле

$$K_{рас} = \frac{1}{1/\alpha_1 + \Sigma r + 1/\alpha_2}, \quad (6.11)$$

где  $\Sigma r_3 = \delta_{ст} / \lambda_{ст} + 2r_3$  – термическое сопротивление стенки и загрязнений стенок со стороны воды, (м<sup>2</sup>·К)/Вт;  $\delta_{ст}=0,003$  м – толщина стенки трубы;  $\lambda_{ст}=46,5$  Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности

материала стенки трубы (углеродистая сталь);  $r_3=1/2900$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$ ) – термическое сопротивление загрязнений со стороны воды.

При установившемся процессе теплопередачи через любое сечение, перпендикулярное направлению теплопередачи, проходит одинаковое количество тепла  $Q$ . Потому расчет коэффициента теплоотдачи  $\alpha_2$  сводится к подбору температуры стенки, удовлетворяющей равенству  $Q_1=Q_2=Q_{\text{ст}}=Q$ .

Для удельного количества тепла  $q=Q/F$  имеем

$$q_1 = q_2 = q_{\text{ст}} = q, \quad q_1 = \alpha_1 \cdot (t_{\text{cp1}} - t_{\text{ст1}}), \quad q_2 = \alpha_2 \cdot (t_{\text{ст2}} - t_{\text{cp2}}), \\ q_{\text{ст}} = \lambda_{\text{ст}} \cdot (t_{\text{ст1}} - t_{\text{ст2}}) / \delta_{\text{ст}}, \quad q = K_{\text{расч}} \cdot \Delta t_{\text{cp}},$$

где  $t_{\text{ст1}}$  – температура стенки трубы со стороны горячей воды,  $K$ ;  $t_{\text{ст2}}$  – температура стенки трубы со стороны холодной воды,  $K$ .

Принимают температуру стенки в первом приближении равной

$$t_{\text{ст2}} = t_{\text{cp2}} + (2 \dots 5) \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Рассчитывают значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_2$  по формуле (6.10).

Рассчитывают значение плотности теплового потока со стороны холодного теплоносителя по формуле

$$q_2 = \alpha_2 \cdot (t_{\text{ст2}} - t_{\text{cp2}}).$$

Определяют температуру стенки со стороны горячей воды

$$t_{\text{ст1}} = t_{\text{cp2}} + q_2 \cdot \Sigma r_{\text{ст}}.$$

Рассчитывают значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_1$  по формуле (6.9).

Определяют плотность теплового потока со стороны горячего теплоносителя по формуле

$$q_1 = \alpha_1 \cdot (t_{\text{cp1}} - t_{\text{ст1}}).$$

Сравнивают значение  $q_1$  и  $q_2$ . Если  $q_1 = q_2$  или расхождения между ними не превышают 5%, то температура стенки выбрана верно и тогда определяют  $K_{\text{расч}}$  по формуле (6.11).

Если  $q_1$  не равно  $q_2$ , задаются новым значением  $t_{\text{ст2}}$  и расчеты приближения повторяют, как описано выше.

Если и во втором приближении  $q_1$  не равно  $q_2$ , тогда на основе полученных данных истинное значение температуры стенки определяют графическим построением.

Для этого строят график в координатах  $q - t_{ст2}$ , как показано на рисунке 6.2.

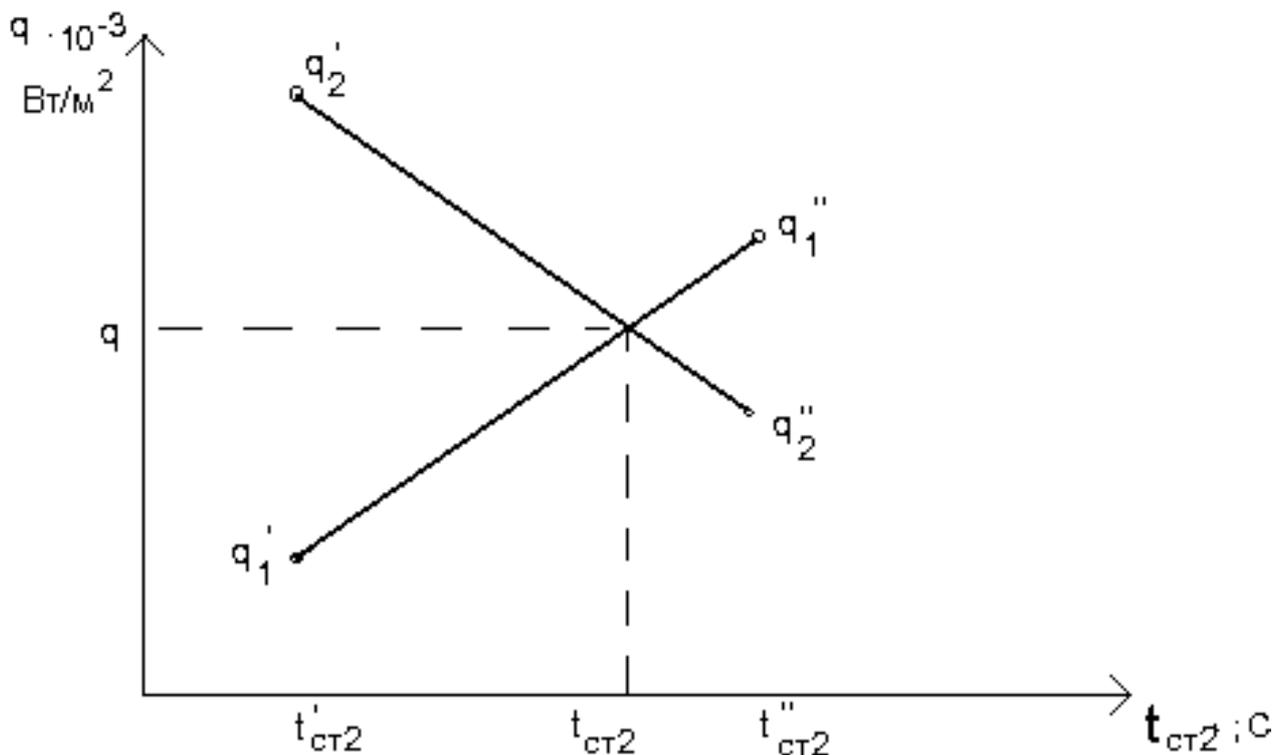


Рисунок 6.2 - Определение истинного значения температуры стенки.

Наносят на график значения  $t_{ст2}$  первого приближения и соответствующие ей значения  $q_1'$  и  $q_2'$ , затем наносят на график значение  $t_{ст2}$  второго приближения и соответствующие ей приближения  $q_1''$  и  $q_2''$ .

Считая при небольших изменениях температуры стенки зависимость  $q = f(t_{ст2})$  линейной, через полученные точки проводят прямые  $q_1 = f_1(t_{ст2})$  и  $q_2 = f_2(t_{ст2})$ . Точка пересечения определяет истинное значение теплового потока  $q$  и температуру  $t_{ст2}$ .

Затем уточняют величины  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ,  $K_{расч.}$  по выражениям:

$$\alpha_1 = q / (t_{ср1} - t_{ст1}), \quad \alpha_2 = q / (t_{ст2} - t_{ср2}), \quad K_{расч} = q / \Delta t_{ср}.$$

Сравнивают опытное  $K_{оп}$  и расчетное  $K_{расч}$  значения коэффициентов теплопередачи и определяют расхождение полученных данных

$$\varepsilon_k = \frac{K_{расч} - K_{оп}}{K_{оп}} \cdot 100\%.$$

Результаты расчётов заносят в таблицу 6.2.

## Оформление отчёта

В отчёте о выполненной работе должны содержаться следующие данные.

Дата проведения работы.

Цель работы.

Схема установки.

Результаты измерений и справочные данные к расчетам.

Обработка опытных данных.

Выводы по работе.

Таблица 6.2 - Результаты расчётов коэффициента теплопередачи

Приближения	Горячий теплоноситель							Холодный теплоноситель							
	Re <sub>1</sub>	Pr <sub>1</sub>	Pr <sub>ст1</sub>	t <sub>ст1</sub> , °C	Nu <sub>1</sub>	α <sub>1</sub> , $\frac{Вт}{м^2К}$	q <sub>1</sub> , $\frac{Вт}{м^2}$	Re <sub>2</sub>	Pr <sub>2</sub>	Pr <sub>ст2</sub>	t <sub>ст2</sub> , °C	Nu <sub>2</sub>	α <sub>2</sub> , $\frac{Вт}{м^2К}$	q <sub>2</sub> , $\frac{Вт}{м^2}$	K <sub>рас</sub>
1															
2															
3															

### Контрольные вопросы

1. Для чего используют передачу тепла в технике?
2. Назовите типы теплообменников, применяемых в отрасли.
3. Для чего служит ротаметр? Как он устроен?
4. Объясните движущую силу процесса теплопередачи.
5. Чем отличается коэффициент теплоотдачи от коэффициента теплопередачи по физическому смыслу?
6. Какова связь и соотношение между коэффициентами теплоотдачи и теплопередачи, их размерности?
7. Объясните физический смысл критериев подобия теплообмена.
8. Из чего складывается общее термическое сопротивление при передаче тепла от горячего теплоносителя к холодному в теплообменном аппарате?
9. Как влияет термическое сопротивление стенки на процесс переноса тепла?

10. Как интенсифицировать процесс теплопередачи?

11. Какие параметры работы промышленных теплообменных аппаратов подлежат контролю?

Приложение

Таблица - Физические свойства воды

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/ (кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^3$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr	$\beta \cdot 10^4$ , 1/К
10	999,7	4,19	57,5	1,31	1,31	9,52	0,7
20	998,2	4,19	59,9	1	1,01	7,02	1,82
30	995,7	4,18	61,8	0,8	0,81	5,42	3,21
40	992,2	4,18	63,4	0,66	0,66	4,31	3,87
50	988,1	4,18	64,8	0,55	0,55	3,54	4,49
60	983,2	4,18	65,9	0,47	0,47	2,98	5,11
70	977,8	4,19	66,8	0,41	0,41	2,55	5,7
80	971,8	4,19	67,5	0,36	0,36	2,21	6,32
90	965,3	4,19	68	0,32	0,32	1,95	6,95

## ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ

**Цель и содержание работы.** Целью работы является экспериментальное изучение устройства и работы ректификационной колонны. Содержание работы заключается в определении эффективности насадочной колонны опытным путём.

### Теоретическое обоснование

Ректификация – это массообменный процесс многократного взаимного диффузионного обмена компонентами паровой и жидкой фаз, в результате, которого паровая фаза обогащается низкокипящими компонентами, а жидкая – высококипящими. Процесс проводят с целью разделения исходных парожидких смесей на практически чистые компоненты или группы компонентов. Ректификацию осуществляют в вертикальных колонных аппаратах, внутри которых располагают устройства для контактирования паровой и жидкой фаз.

Полная ректификационная колонна состоит из следующих секций: питательной, концентрационной (укрепляющей) и отгонной (исчерпывающей). Конденсатор (дефлегматор) и испаритель (кипятильник) могут быть оформлены как секции колонны или как отдельные аппараты, работающие совместно с ней. Неполная ректификационная колонна может состоять из секции питания и укрепляющей секции – укрепляющая колонна, секции питания и отгонной секции – отгонная колонна.

Простая ректификационная колонна разделяет сырьё на два продукта: верхний – дистиллят и нижний – остаток. Если в колонну вводится один или несколько сырьевых потоков, а получается три и более продуктов: верхний, нижний и боковые погоны, то такую ректификационную колонну называют сложной. Сложная колонна может иметь несколько укрепляющих или отгонных секций.

Различают периодическую, и непрерывную ректификацию. При непрерывной ректификации сырьё поступает в колонну непрерывно и продукты разделения выводятся из аппарата также непрерывно. При

периодической ректификации загрузка сырья периодическая, а отвод дистиллята – непрерывный в течение всего промежутка проведения процесса. Состав и количество кубовой жидкости изменяется непрерывно.

Процесс ректификации обеспечивает разделение компонентов, если их температуры кипения различаются всего лишь на 0,5 °С.

В промышленной практике используют два основных типа ректификационных колонн: тарельчатые и насадочные.

Тарелки представляют собой разновидность контактных устройств, имеющих отверстия, щели, прорези для распределения потока паров в слой жидкости, протекающей через тарелку. Движение жидкости сверху вниз с тарелки на тарелку, которые установлены на определенном расстоянии друг от друга, происходит под действием силы тяжести, а пара снизу вверх – под действием разности давлений внизу и вверху колонны. Тарелки обеспечивают ступенчатый контакт пара и жидкости и их сепарацию после осуществления контактирования. Наиболее известными конструкциями тарелок являются: колпачковые, клапанные, с S – образными элементами, ситчатые, решетчатые, струйные.

Насадочные слои из тел различной конфигурации укладывают на решетках по высоте колонны. Контактное взаимодействие пара и жидкости осуществляется непрерывно в пределах каждого отдельного слоя. Для равномерного орошения насадки жидкостью над каждым слоем устанавливают специальное распределительное устройство. В качестве насадочных тел используют кольца Рашига, Палля, Лессинга, седловидные насадки Берля, спирали, шарики, сетчатые объемные тела из тонкой проволоки типа Стрейпак, Гудлое, Зульцер, пакеты сеток и др.

Процесс ректификации в простой полной колонне протекает следующим образом. Сырьевая смесь поступает при определенных температуре и давлении в секцию питания. Здесь происходит однократное испарение сырья: паровая фаза поднимается в верхнюю концентрационную секцию, а жидкая стекает в нижнюю отгонную секцию. Для обеспечения контактирования паровой и жидкой фаз на тарелках

или в слоях насадки и необходимого температурного режима по высоте колонны в ее верхнем сечении подают жидкое орошение, более холодное, чем поднимающиеся пары, а в нижнем – паровое орошение, более горячее, чем стекающая жидкость. При этом составы орошений близки к составам верхнего и нижнего продуктов колонны соответственно.

Контактирование на тарелках или в слоях насадки потоков неравновесных паров и жидкости приводит к перераспределению компонентов между фазами: пары охлаждаются и частично конденсируются, а жидкость нагревается и частично испаряется. При этом из паров конденсируются преимущественно высококипящие компоненты, а из жидкости испаряются низкокипящие компоненты. В каждом элементарном процессе контактирования исходная неравновесная парожидкая система стремится к состоянию равновесия, при котором паровая фаза обогащается легколетучими компонентами, а жидкая – менее летучими.

При достаточно большом числе ступеней контактирования вверху колонны могут быть получены пары, содержащие практически чистый низкокипящий компонент или наиболее легкие компоненты исходной смеси, а внизу колонны – жидкость, содержащая практически чистый высококипящий компонент или наиболее тяжелые компоненты исходной смеси.

Степень контактирования, на которой достигается состояние равновесия паровой и жидкой фаз (т.е. максимальный разделительный эффект), называют теоретической. На реальной или практической ступени контактирования состояние равновесия не достигается из-за недостаточного времени пребывания потоков пара и жидкости на ней. Поэтому разделительный эффект такой ступени меньше, чем теоретический. Эффективность единичной  $i-1$ -й тарелки в колонне оценивают при помощи к.п.д. по Мерффри

$$\eta_{i-1} = (y'_{i-1} - y'_i) / (y^{\circ}_{i-1} - y'_i); \quad \eta_{i-1} = (x'_{i-2} - x'_{i-1}) / (x'_{i-2} - x^{\circ}_{i-1}),$$

где  $y'_{i-1}$  и  $y'_i$  – составы паров на входе и выходе тарелки;  $y^{\circ}_{i-1}$  – состав равновесного пара на выходе с тарелки;  $x'_{i-2}$ ,  $x'_{i-1}$  – составы жидкости

на входе и выходе тарелки;  $x_{i-1}^{o1}$  – состав равновесной жидкости на выходе с тарелки.

Таким образом, под к.п.д. Мерффри понимают отношение действительного изменения состава паров или жидкости, проходящих тарелку, к теоретически возможному при достижении состояния равновесия фаз.

Учитывая, что к.п.д. меняется от тарелки к тарелке, в расчетной практике оперируют усредненным показателем  $\eta_{cp}$  для всех тарелок в колонне, предварительно рассчитывая его или определяя по опытным данным.

Реальное (практическое) число тарелок в колонне рассчитывается по формуле:

$$N_P = N_T / \eta_{cp},$$

где  $N_T$  - число теоретических тарелок (ступеней контактирования).

Методы определения  $N_T$  сравнительно хорошо описаны в литературе. Значения к.п.д. тарелок зависят от конструкции тарелок, условий разделения и лежат в пределах 0,25 – 0,80.

Разделительную эффективность насадочных колонн оценивают при помощи высоты насадки, эквивалентной теоретической ступени контактирования  $h_{вэТС}$ , м, которую определяют экспериментально или рассчитывают известными методами. Необходимую высоту слоя насадки в ректификационной колонне рассчитывают по формуле

$$H_H = N_T \cdot h_{вэТС}.$$

Для управления работой промышленной ректификационной колонны необходимо иметь информацию о температурах и давлениях по высоте аппарата, расходах и температурах сырьевого и продуктовых потоков, горячего и холодного орошений, качестве продуктов разделения. Эти данные получают на основе показаний соответствующих контрольно-измерительных приборов.

### **Аппаратура и материалы**

При выполнении опытной части работы используются:

- опытная установка для изучения работы ректификационной колонны;
- рефрактометр;
- образец смеси для определения эффективности колонны;
- вода от сети;
- пробоотборники;
- комплект термометров;
- электропечь.

### **Указания по технике безопасности**

Для безопасного проведения лабораторной работы необходимо:

- проводить работу только в присутствии лаборанта;
- не превышать расходы воды через холодильник колонны;
- не превышать интенсивность обогрева куба колонны;
- соблюдать меры предосторожности в обращении со стеклянной посудой;
- выполнять работу в строгом соответствии с методическими указаниями.

### **Методика и порядок выполнения работы**

Для изучения процесса ректификации используется неполная концентрационная (укрепляющая) насадочная колонна со стеклянной насадкой типа "кольца Рашига". Такая колонна позволяет получать только один продукт с высоким содержанием основного компонента - дистиллят. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 7.1.

Установка предназначена для проведения периодического процесса ректификации. Разделяемую смесь загружают в трехгорловую стеклянную колбу-куб 1, снабжённый термометром 2 и пробоотборником 8. Подогрев куба до необходимых температур осуществляют при помощи электроплиты 9. Стеклянная колонна 3 вставлена нижним концом в куб, загружена насадочными кольцами и снабжена защитной теплоизолирующей рубашкой 4, а в верхней части – термометром, обратным холодильником 6 и отборником дистиллята 7.

В качестве сырья для изучения процесса ректификации и определения эффективности насадочной колонны используют образец бинарной смеси этанол - вода. В опытах реализуют режим полного или бесконечного орошения (флегмовое число  $r \rightarrow \infty$ , отбор продукта не производят).

Работу проводят в следующем порядке. Готовят исходную смесь в количестве 300 - 350 см<sup>3</sup> с концентрацией спирта 30 – 50% объемн.

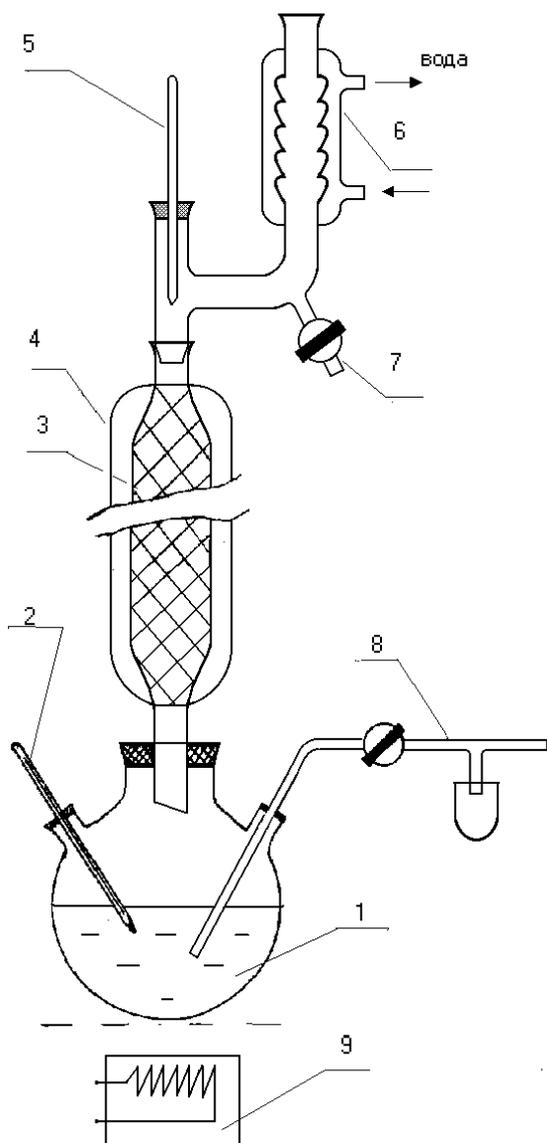


Рисунок 7.1 - Схема экспериментальной установки: 1 – куб; 2, 5 – термометры; 3 – колонна; 4 – внешняя рубашка; 6 – холодильник; 7,8 – пробоотборник; 9 – электроплита.

Определяют показатель преломления исходной смеси при помощи рефрактометра и загружают ее в куб колонны. Смесь должна заполнить колбу на 2/3 объема. Для обеспечения равномерного кипения на дно колбы кладут небольшие кусочки обожженной глины. Собирают установку, обращая особое внимание на герметичность разъемных соединений, включают воду в холодильнике и обогрев куба. Доводят смесь в кубе до кипения и визу-

ально наблюдают за процессом прогрева слоя насадки в колонне. При этом происходит конденсация паров в слое насадки, граница которой постепенно перемещается снизу вверх, и обратное движение конденсата в куб.

После того, как пары достигнут конденсатор-холодильник, и установятся температуры верха  $t_B$  и низа  $t_H$  колонны, записывают показатели режима; далее реализуют режим захлебывания колонны для вытеснения воздуха из слоя насадки путем увеличения обогрева куба.

При увеличении объема паров, поступающих из куба, возрастает обратный поток флегмы и происходит заполнение слоя насадки жидкостью по направлению снизу-вверх.

После достижения захлебывания колонны на  $3/4$  ее высоты уменьшают обогрев куба, избыток жидкости спускают из колонны и возвращают первоначальный режим работы (столб жидкости не должен подниматься над слоем насадки и попадать в холодильник.)

Выдержку установившегося режима ректификации при полном орошении осуществляют в течение получаса, а затем отбирают пробы дистиллята с верха колонны и остатка из куба. Пробы охлаждают, определяют показатели преломления, записывают показатели температурного режима. Затем прекращают обогрев куба и опыт заканчивают. Холодильник выключают после остывания жидкости и прекращения процесса кипения.

По значениям показателей преломления определяют по справочным данным мольный состав сырья  $X_L$ , дистиллята  $Y_D$ , остатка  $X_R$ . Число ступеней контактирования в колонне определяют двумя методами.

По первому методу используют диаграмму  $Y'-X'$ . Для этого при средней температуре в колонне  $t_{cp} < 0,5(t_B + t_H)$  рассчитывают коэффициент относительной летучести смеси этанол - вода  $\alpha = P_1 / P_2$  (давления насыщенных паров этанола  $P_1$  и воды  $P_2$  определяют по справочным данным), далее рассчитывают координаты кривой равновесия (5 – 6 значений ) по формуле:

$$y' = \alpha x' / (1+x'(\alpha-1)).$$

По полученным данным строят график кривой равновесия как для идеальной смеси.

Равновесная кривая  $Y'-X'$  для данной смеси может быть построена и по справочным данным.

Рабочая линия совпадает с линией равного состава (диагональю), поскольку опыт проводился в режиме полного отношения ( $r \rightarrow \infty$ ).

На графике отмечают составы  $X_L$ ,  $Y_D$ ,  $X_R$  и определяют минимальное число ступеней контактирования  $N_{MIN}$  путем построения ступенчатой линии между линиями равновесия и рабочей (см. рисунок 7.2).

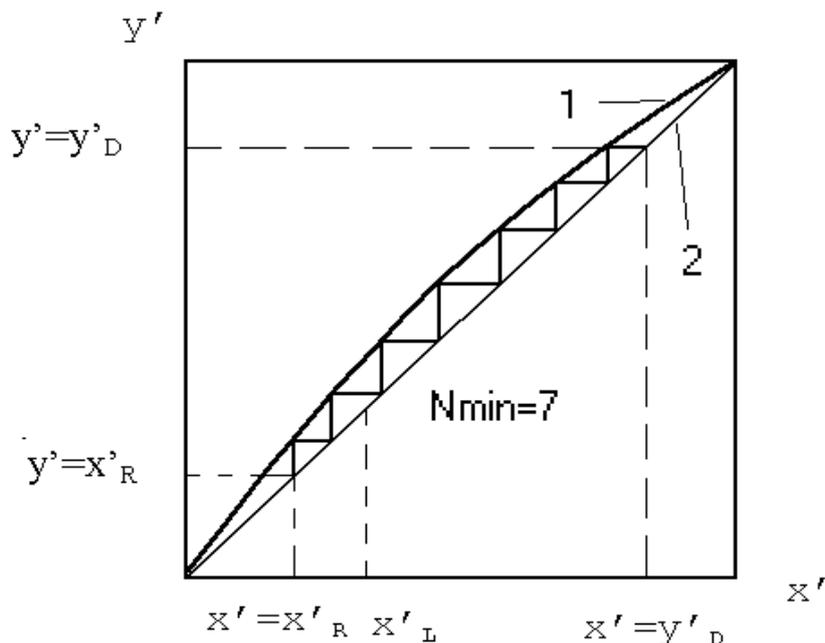


Рисунок 7.2 - Определение числа ступеней контактирования по диаграмме  $y'-x'$ : 1 - линия равновесия; 2 - рабочая линия (при  $r \rightarrow \infty$ ).

По второму методу  $N_{MIN}$  рассчитывают по формуле

$$N_{MIN} = \lg ( y'_D / (1 - y'_D) \cdot (1 - x'_R / x'_R) ) / \lg \alpha.$$

Максимальную эффективность колонны оценивают при помощи высоты насадки, эквивалентной ступени контактирования

$$h_{ВЭТС} = H_H / N_{MIN}.$$

### Оформление отчёта

В отчёте о выполненной работе должны содержаться следующие данные.

Дата проведения работы.

Цель работы.

Схема установки.

Результаты измерений и справочные данные к расчетам.

Характеристика веществ.

Обработка опытных данных.

Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Что понимают под ректификацией?
2. Что является движущей силой процесса ректификации?
3. В чём отличие ректификации от перегонки?
4. Какие разновидности процесса ректификации известны?
5. Какая колонна называется полной?
6. Какие существуют разновидности неполных колонн?
7. Что понимают под контактными устройствами ректификационных колонн?
8. Какие разновидности контактных устройств известны?
9. Что понимают под эффективностью контактного устройства?
10. Что понимают под режимом полного орошения в ректификационной колонне?
11. Как определяют минимальное число ступеней контактирования при ректификации?
12. Как устроены тарельчатые и насадочные ректификационные колонны?
13. Какие параметры работы промышленных ректификационных колонн подлежат контролю?

## ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Цель и содержание работы.** Целью работы является изучение процесса сушки материалов. Содержание работы заключается в определении технологических показателей кинетики сушки опытным путём.

### Теоретическое обоснование

Различают естественную и искусственную сушку материалов. В промышленности чаще применяют искусственную сушку, которая бывает: конвективная, контактная, диэлектрическая, радиационная, сублимационная. Наиболее масштабной по использованию является конвективная сушка, при которой сушильный агент омывает поверхность влажного материала и уносит удаляемую влагу. При этом влага частично диффундирует в поток агента, но в основном испаряется.

Сушке подвергают песок, глину, адсорбенты и катализаторы, кристаллы различных веществ, влажные осадки после отстаивания, фильтрования, центрифугирования, строительную продукцию, лесотехнические материалы, сельскохозяйственную продукцию и др.

По технологическому назначению сушка относится к массообменным процессам, поскольку протекает с переходом вещества из одной фазы в другую через поверхность раздела. По характеру движущих сил чаще всего является типичным массо- и теплообменным процессом, поскольку реализуется при подводе тепла к поверхности материала, что интенсифицирует испарение влаги и увеличивает движущую силу.

Под кинетикой процесса сушки понимают изменение средних по объёму высушиваемого тела влажности и температуры с течением времени. Кинетика сушки влажного материала определяет выбор оптимальных параметров сушильного агента (температуры, давления, влажности), конструкцию и основные размеры сушильного устройства. Детальное изучение кинетики позволяет организовать процесс

сушки с наименьшими энергозатратами и получать продукт высокого качества.

Поскольку сушка является массо- и теплообменным процессом, то её кинетика определяется в первую очередь формой связи влаги с материалом.

В зависимости от величины энергии связи влаги (чаще воды) с сухим веществом материала различают следующие её формы:

– химическая (ионная и молекулярная) связь; химически связанная влага может быть выделена из молекулы соединения при помощи химической реакции или прокаливанию, поэтому она в процессе сушки обычно не удаляется;

– физико-химическая (адсорбционная и осмотическая) связь включает влагу, поглощенную в виде пара из окружающей газовой среды и удерживаемую на поверхности вещества под действием её молекулярного силового поля (адсорбированная влага), а также влагу, входящую в состав растительных и животных клеток (осмотическая);

– физико-механически связанная влага представляет собой жидкость, захваченную при образовании структуры геля, находящуюся в порах и макрокапиллярах материала, а также влагу смачивания, обусловленную прилипанием жидкости при непосредственном соприкосновении её с поверхностью тела.

Физико-механически связанная влага называется свободной и может быть удалена даже механическим путем.

При исследовании процесса сушки имеют дело с физико-химической и физико-механической связями влаги с материалом.

Количественно содержание влаги в материале оценивается его влажностью. Различают относительную влажность  $w$ , т.е. массу влаги, содержащейся в материале  $W$ , кг, отнесенную к общей массе образца  $G$ , кг

$$w = W / G \quad (8.1)$$

и абсолютную влажность  $w^c$ , определяемую по отношению к 1 кг абсолютно сухого вещества в исследуемом материале  $G_{ac}$ , кг

$$w^c = W / G_{ac} \quad (8.2)$$

Относительная и абсолютная влажности выражаются в долях единицы или в процентах. При анализе процесса сушки удобнее пользоваться абсолютной влажностью, т.к. количество абсолютно сухого вещества в образце при любых условиях остаётся постоянным.

При исследовании кинетики сушки необходимо установить влияние на скорость протекания процесса различных внутренних и внешних факторов. Скорость сушки определяется уменьшением влажности  $dw^c$  за некоторый бесконечно малый отрезок времени  $dt$ , т.е.

$$V = dw^c/dt. \quad (8.3)$$

Для конечных отрезков времени скорость сушки определяется количеством влаги  $\Delta W$ , удаленной по отношению к 1 кг абсолютно сухого вещества материала  $G_{ac}$  в единицу времени  $\Delta t$  и средняя скорость  $\bar{V}$  в данном случае будет равна

$$\bar{V} = \frac{\Delta W}{G_{ac}\Delta t} = \frac{\Delta w^c}{\Delta t}. \quad (8.4)$$

Следует отличать скорость сушки  $dw^c/dt$  от скорости массообмена  $dW/Fdt$ , которая определяет массу влаги  $dW$ , удаленную с единицы поверхности материала  $F$  за единицу времени  $dt$  и называется интенсивностью сушки. При анализе процесса удобнее пользоваться понятием скорости сушки, т.к. истинную поверхность материала зачастую определить очень трудно. Кроме того, в процессе высушивания она может изменяться (уменьшаться) для материалов, дающих усадку.

Между скоростью и интенсивностью сушки существует следующая зависимость

$$\frac{dW}{Fdt} = \frac{dw^c}{dt} \frac{G_{ac}}{F}. \quad (8.5)$$

Как отмечалось, сушка является (в первую очередь) массообменным процессом, протекающим в системе с твердой фазой, то основное уравнение массопередачи применительно к каждой из фаз может быть записано следующим образом

$$\frac{dW}{Fdt} = K_T \cdot (w^c - w_p) = K_T \cdot (c_p - c), \quad (8.6)$$

где  $dW/Fdt$  - средняя по поверхности высушиваемого тела скорость массопередачи, кг влаги/  $m^2 \cdot c$  (интенсивность сушки);  $(w^c - w_p)$  - движущая сила процесса по влажности твердой фазы,  $\frac{\text{кг.влаги}}{\text{кг.а.с.в} - \text{ва}}$ , представляющая собой разность рабочей (текущей) влажности материала  $w^c$  и его равновесной влажности  $w_p$ , которая достигается при установлении динамического равновесия между материалом и окружающей средой при бесконечно большом времени сушки;  $(c_p - c)$  - движущая сила процесса (массообменного) по газовой фазе,  $\text{кг}/m^3$ ; представляющая собой разность равновесной  $c_p$  и текущей концентраций  $c$  пара в окружающей среде (в обоих случаях движущая сила процесса характеризует степень отклонения системы от равновесия);  $K_T$  и  $K_G$  - коэффициенты массопередачи по твердой и газовой фазам, которые при выбранных единицах измерения концентраций имеют размерности:

$$K_T = \frac{\text{кг.влаги}}{m^2 c \frac{\text{кг.влаги}}{\text{кг.а.с.в} - \text{ва}}} \quad K_G = \frac{\text{кг.влаги}}{m^2 c \frac{\text{кг.влаги}}{\text{кг.а.с.в} - \text{ва}}}$$

Движущую силу процесса по газовой фазе часто выражают при помощи парциальных давлений пара  $P$  или влагосодержания влажного газа  $X$ , которые можно связать с объёмной концентрацией  $C$  при помощи уравнения состояния идеального газа (уравнения Менделеева–Клапейрона). Отсюда

$$\frac{dW}{Fdt} = K_p \cdot (P_p - P) = K_x \cdot (X_p - X), \quad (8.7)$$

где  $K_p$  и  $K_x$  - коэффициенты массопередачи по газовой фазе, отнесенные к разности парциальных давлений пара,  $\frac{\text{кг}}{m^2 c \text{Па}}$  и влагосодержа-

ний газа,  $\frac{\text{кг}}{m^2 c \frac{\text{кг.влаги}}{\text{кг.а.с.в} - \text{ва}}}$ ;  $(P_p - P)$  - движущая сила процесса, равная раз-

ности давления насыщенного пара при температуре поверхности материала и парциального давления пара в объёме сушильного агента  $P$ , Па;  $(X_p - X)$  - движущая сила процесса, равная разности равновесного

по отношению к влажному материалу влагосодержания газа  $X$  и влагосодержания в потоке сушильного агента,  $\frac{\text{кг.влаги}}{\text{кг.а.с.в} - \text{ва}}$ .

При испарении свободной влаги все подводимое к высушиваемому материалу тепло расходуется на испарение влаги, т.е. скорость испарения лимитируется подводом тепла.

Тогда

$$\frac{dQ}{F d\tau} = \alpha \cdot (t_{\Gamma} - t_{\Pi}) = \frac{dW}{F d\tau} r, \quad (8.8)$$

где  $\frac{dQ}{F d\tau}$  – удельный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от газа к поверхности материала, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $t_{\Gamma}$  и  $t_{\Pi}$  – температуры потока газа и поверхности материала, °С;  $r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Отсюда

$$\frac{dW}{F d\tau} = K_T \cdot (t_{\Gamma} - t_{\Pi}),$$

где  $K_T$  – коэффициент массопередачи, отнесенный к разности температур, кг влаги/(м с К);  $(t_{\Gamma} - t_{\Pi})$  – движущая сила процесса (теплого), равная разности температур сушильного агента и поверхности материала, К.

Таким образом, движущая сила процесса сушки может быть выражена различными способами: в терминах как массообменного ( $\Delta c$ ,  $\Delta X$ ,  $\Delta P$ ), так и теплового ( $\Delta t$ ) процесса. При этом пока  $\Delta c > 0$  процесс протекает. Если и  $\Delta t > 0$ , то процесс протекает более интенсивно.

Кинетика сушки влажного материала обычно исследуется экспериментально путем нахождения зависимостей температуры прогрева высушиваемого материала  $t = f_1(\tau)$ , кривой сушки  $w^c = f_2(\tau)$  и скорости сушки  $V = f_3(\tau)$ . Во всех этих зависимостях легко установить наличие трех этапов протекания процесса.

На температурной кривой  $t = f_1(\tau)$  вначале наблюдается (рисунок 8.1) прогрев материала от температуры, с которой он вносится в сушилку ( $t_{\Pi}$ ), до температуры мокрого термометра ( $t_{\text{М}}$ ), отвечающей



риала, соответствующая ей - первой критической влажностью. Конечная влажность материала (точка Д) характеризует равновесную влажность ( $w_p$ ) при данных условиях сушки.

По кривым сушки строятся кривые скорости сушки, представляющие собой графическое выражение функции  $V = f_3(\tau)$ , или скорости сушки от абсолютной влажности образца (см. рисунок 8.2).

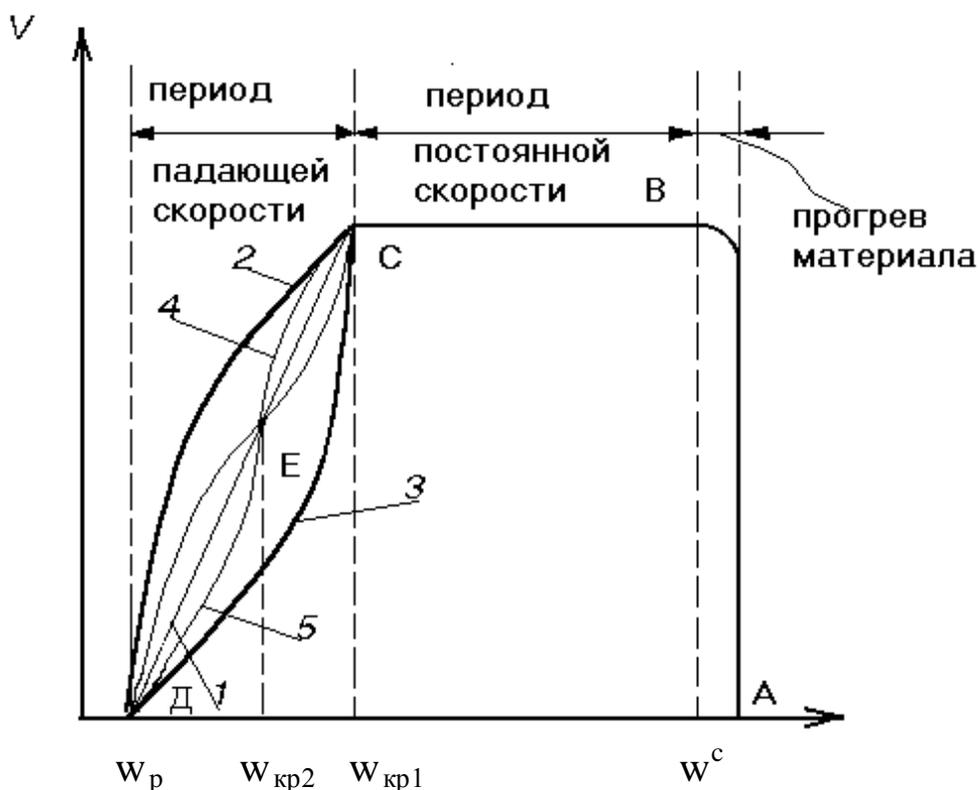


Рисунок 8.2 - Кривая скорости сушки  $V = f(w)$ .

Скорость сушки определяется по кривой сушки путем графического дифференцирования как тангенс угла наклона касательной, проведенной к кривой сушки в данной точке к оси абсцисс (угол  $\alpha$  на рисунке 8.1) т.е.

$$V = dw_c / dt = \operatorname{tg} \alpha. \quad (8.9)$$

На кривой скорости сушки различаются те же периоды, что и на кривых сушки и температуры материала. Начальный участок кривой АВ, соответствующий увеличению скорости сушки, отвечает прогреву материала при помещении его в сушилку. За ним следует горизонтальный отрезок ВС - период постоянной скорости сушки, которая в данном периоде лимитируется скоростью внешней диффузии (массо-

отдачи) влаги, т.е. её перехода с поверхности испарения в окружающую среду. Движущая сила процесса, определяемая разностью давлений пара над поверхностью материала  $P_m$  и в сушильном агенте  $P_n$ , будет оставаться постоянной

$$\Delta P = P_m - P_n = P_n - P_n = \text{const}, \quad (8.10)$$

где  $P_n$  - давление насыщенного пара при температуре поверхности материала. При этом  $P_n = P_m = \text{const}$ .

В первой критической точке (С) удаляется механически связанная влага и наступает второй период (отрезок ВС на рисунке 8.2) падающей скорости сушки. Для него характерно изменение давления пара над поверхностью образца в зависимости от влажности материала, т.е.  $P_n = f(w^c)$ , что сказывается на уменьшении величины движущей силы процесса  $\Delta P = P_m - P_n$ , ведущем к снижению его скорости.

Кривые скорости сушки в период падающей скорости могут быть различной конфигурации (линии 1-5 рисунка 8.2), по их виду можно судить о связи влаги с материалом. Так линия 1 является прямой, она характерна для тонких пористых материалов (бумага, тонкий картон, ткань и т.д.). Линия типа 2 соответствует сушке коллоидных тел, а линия типа 3 - пористых керамических материалов. Все эти линии имеют одну критическую точку С.

Материалам, имеющим более сложную структуру, присущи более сложные кривые скорости сушки. Кривая 4 характерна для сушки глины, а кривая 5 - сухарей. На этих кривых наблюдается вторая критическая точка (Е), которой соответствует вторая критическая влажность ( $w_{кр2}$ ). По мере удаления внутренней влаги материала давление пара над его поверхностью ( $P_m$ ) уменьшается, приближаясь в пределе к величине парциального давления паров жидкости в сушильном агенте ( $P_n$ ). Следовательно, движущая сила процесса сушки уменьшается, приближаясь к нулю  $\Delta P = P_m - P_n \rightarrow 0$ , скорость процесса асимптотически приближается к нулю.

Момент времени, когда давление пара над поверхностью материала будет равно парциальному давлению паров в окружающей среде, соответствует установлению динамического равновесия жидкости в

материале с влагой сушильного агента, движущая сила процесса становится равной нулю и сушка заканчивается (т. Д рисунков 8.1, 8.2). Влажность материала, соответствующая т. Д, называется равновесной  $w_p$ . Поскольку она отвечает равенству  $P_m = P_n$  ( $P_m - P_n = 0$ ), то на величину равновесной влажности будут воздействовать факторы, влияющие на значения  $P_m$  или  $P_n$ . К ним относятся: форма связи влаги с материалом, общее давление в сушилке, влажность и температура сушильного агента.

Кривые сушки, скорости сушки и прогрева материала имеют большое практическое значение. Они позволяют установить время сушки, оценить формы связи влаги с материалом, выбрать оптимальный вариант и режим сушки. Используются при проектировании и расчете промышленных сушилок.

Для управления работой промышленных сушилок необходимо иметь набор разнообразной информации, характер которой определяется конструкцией оборудования и условиями проведения процесса. Для конвективных сушилок необходимы данные о расходах материала и сушильного агента на входе и выходе, их температурах и влажности. Если сушилки имеют движущиеся элементы, то необходима информация о скоростях их движения, качестве смазки, показателях вибрации и т.п. Перечисленные данные получают на основе показаний соответствующих контрольно-измерительных приборов.

### **Аппаратура и материалы**

При выполнении опытной части работы используются:

- опытная установка для изучения технологии сушки;
- образец материала;
- секундомер.

### **Указания по технике безопасности**

Для безопасного проведения лабораторной работы необходимо:

- проводить работу только в присутствии лаборанта;
- не превышать интенсивность обогрева образца материала;

– выполнять работу в строгом соответствии с методическими указаниями.

### Методика и порядок выполнения работы

Лабораторная установка состоит из сушильного шкафа и лабораторных весов. К подвеске весов на длинной нити прикреплена внутри сушильного шкафа чашка, на которую помещается влажный образец высушиваемого материала (рисунок 8.3).

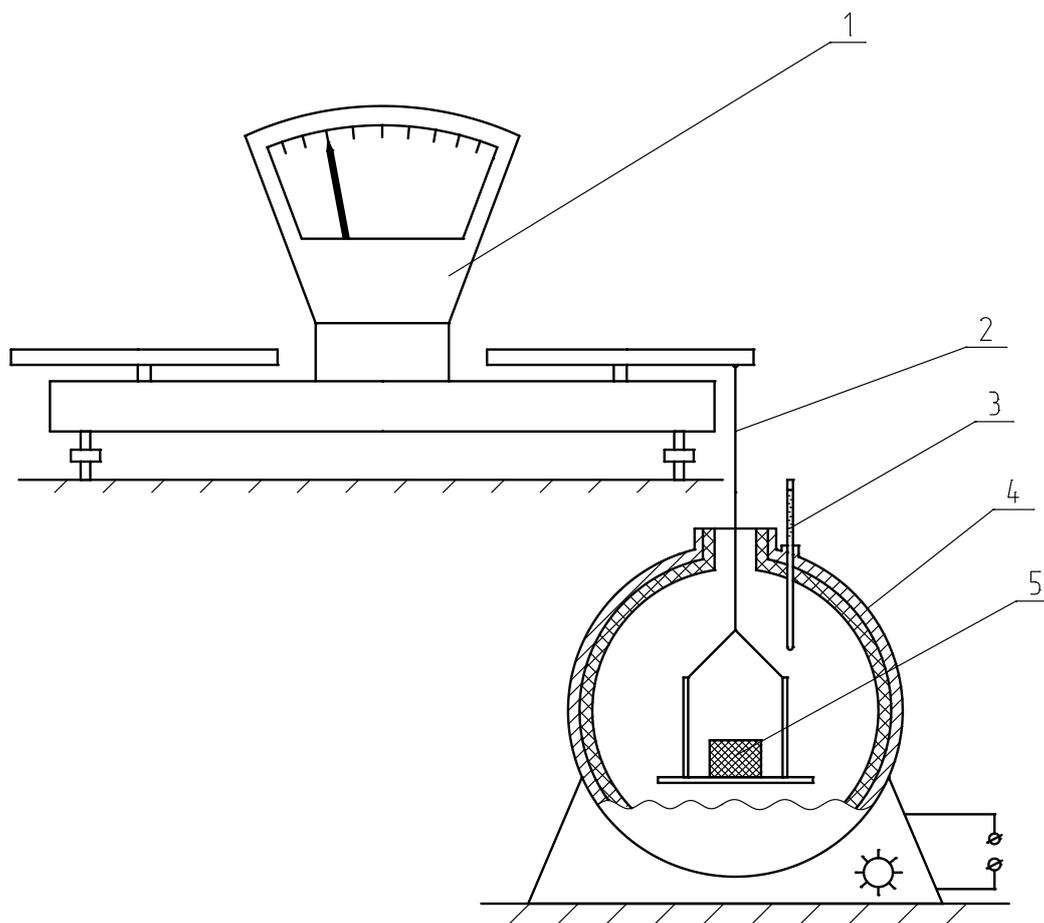


Рисунок 8.3 – Установка сушильная: 1 – весы; 2 – нить с подвеской; 3 – термометр; 4 – сушильный шкаф; 5 – высушиваемый образец.

Перед выполнением работы следует получить у лаборанта исследуемый образец, секундомер и подготовить таблицу 8.1 для записи опытных данных.

**ВНИМАНИЕ!** При загрузке и выгрузке образца соблюдайте меры предосторожности во избежание ожогов!

Устанавливают шкалу весов на нулевую отметку. Взвешивают образец, предварительно измерив площадь поверхности, и опускают его в воду на 1-2 мин. Сжатием или встряхиванием удаляют избыток влаги и помещают образец в ранее включенный лаборантом сушильный шкаф. Через каждые 5 минут по шкале весов считывают показания до получения 3-х одинаковых значений, которые принимают за массу абсолютно сухого образца. Полученные результаты заносят в таблицу опытных данных.

Таблица 8.1 - Результаты измерений

Поверхность образца, м <sup>2</sup>	Масса исходного образца G, кг	Масса влажного образца G <sub>в</sub> , кг	Время опыта τ, мин	Масса абсо- лютно сухо- го образца G <sub>ас</sub> , кг

Обработка результатов опытов включает определение скорости сушки, интенсивности испарения влаги, расчетного времени сушки, которое сравнивают с опытным, и графическое построение зависимостей  $w^c = f_2(\tau)$  и  $V = f_3(\tau)$ .

Обработку полученных результатов проводят в следующем порядке.

1. Кинетику процесса сушки характеризуют изменением во времени влажности материала  $w^c$ , отнесенной к массе абсолютно сухого образца. Эту влажность материала определяют отношением содержания влаги в материале  $W_{ост}$ , равной разности масс влажного образца и абсолютно сухого в данном опыте, к массе абсолютно сухого образца, т.е.

$$w^c = \frac{W_{ост}}{G_{ас}} \cdot 100\% = \frac{G_{в} - G_{ас}}{G_{ас}} 100\% .$$

По полученным результатам строят кривую сушки, выражающую зависимость между влажностью образца  $w^c$  и временем  $\tau$  (рисунк 10.1). На полученной кривой отмечают участки, соответствующие различным периодам сушки, а также две критические влажности  $w^c_{кр1}$  и  $w^c_{кр2}$ .

2. Скорость сушки  $V$  определяют уменьшением влажности материала  $dw^c$  за промежуток времени между соседними замерами по формуле (8.3). Данные о скорости сушки необходимо представить в виде кривой в координатах "скорость сушки - влажность материала"  $V = f_3(\tau)$ . На полученной кривой обозначают также периоды сушки и критические влажности (рисунок 8.2, 8.4).

3. Определяют интенсивность испарения влаги из материала  $m$ ,  $\text{кг}/\text{м}^2\text{ч}$  по формуле  $m = W_{\text{уд}}/F\tau$ .

В данной работе рассчитывается интенсивность испарения влаги за общее время сушки  $\tau$ , ч, и здесь  $W_{\text{уд}}$  - общее количество удаленной влаги, кг;  $F$  - площадь всей поверхности образца,  $\text{м}^2$ .

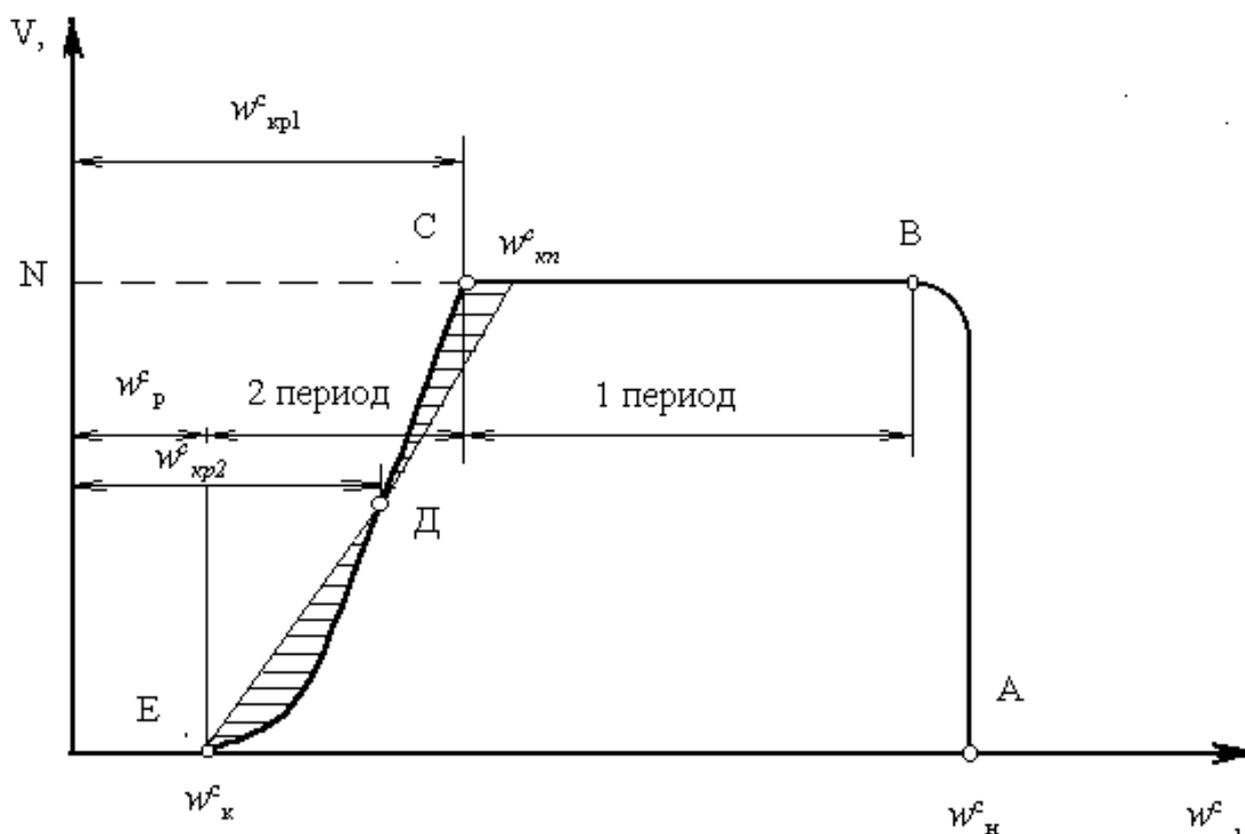


Рисунок 8.4 - Кривая скорости сушки  $V = f(w)$ .

4. Для определения расчетного времени проведения процесса сушки используют графические зависимости  $w^c = f_2(\tau)$  и  $V = f_3(\tau)$ . Продолжительность, ч, первого периода сушки (периода постоянной скорости сушки) определяют из уравнения

$$\tau_1 = \frac{w_H^c - w_{кр1}^c}{V_1},$$

где  $w_H^c$  - начальная влажность образца, %;  $w_{кр1}^c$  - первая критическая влажность образца, которая заменяется приведенной критической влажностью  $w_{кп}^c$  и определяется по изложенной ниже методике, %;  $V_1$  - скорость сушки в первый период, 1/ч, определяют по кривой скорости сушки.

Продолжительность второго периода сушки  $\tau_2$ , ч, периода падающей скорости сушки, определяют из выражения

$$\tau_2 = \frac{w_{кп}^c - w_p^c}{V_1} \lg \frac{w_{кп}^c - w_p^c}{w_k^c - w_p^c}.$$

Здесь  $w_p^c$  - равновесная влажность, %, достижение которой означает полное прекращение дальнейшей убыли влаги в материале;  $w_k^c$  - влажность материала в конце второго периода сушки, %, её значения для расчетов обычно задают из условия  $w_k^c > w_p^c$  (см. рисунок 8.4);  $w_{кп}^c$  - приведенная критическая влажность материала.

Определение величины критической приведенной влажности производят, используя экспериментальные данные по скорости сушки во втором периоде. Для этого необходимо заменить кривую, характеризующую падение скорости сушки во втором периоде, наклонной прямой, проведенной таким образом, чтобы образуемые при этом площадки, заштрихованные на рисунке 8.4, были одинаковыми. Абсцисса точки пересечения этой прямой с линией  $V_1 = \text{const}$  соответствует значению приведенной критической влажности  $w_{кп}^c$ .

Общая продолжительность сушки составляет  $\tau_{расч} = \tau_1 + \tau_2$ . Степень расхождения опытного значения времени сушки с расчетным определяют по формуле:

$$\varepsilon_\tau = \frac{\tau_{оп} - \tau_{расч}}{\tau_{оп}}$$

Результаты выполненных расчетов заносят в таблицу 8.2.

## Оформление отчета

В отчёте о выполненной работе должны содержаться следующие данные.

Дата проведения работы.

Цель работы.

Результаты измерений.

Обработка опытных данных.

Выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Какие материалы подвергают сушке?
2. Что является движущей силой процесса сушки?
3. Перечислите формы связи влаги с материалом.
4. Назовите периоды сушки.
5. Дайте определение скорости сушки.
6. Изобразите на графике кривую "скорость сушки - влажность материала".
7. Что понимают под интенсивностью испарения влаги?
8. Что понимают под равновесным влагосодержанием материала и от чего зависит его значение?
9. Что понимают под критическим влагосодержанием материала?
10. Охарактеризуйте конструкции промышленных сушилок, принцип их работы, достоинства и недостатки.
11. Какие параметры работы промышленных сушилок подлежат контролю?

Таблица 8.2 - Результаты расчетов

Время между замерами $\Delta t$ , мин	
Содержание влаги в материале $W_{ост}$ , кг	
Влажность материала $w_c$ , %	
Измерение влажности материала % за время $\Delta t$ , мин	
Скорость сушки $V$ , 1/ч	
Общее количество удалённой влаги $W_{уд}$ , кг	
Продолжительность первого периода сушки $\tau_1$ , ч	

Продолжительность второго периода сушки $\tau_2$ , ч	
Интенсивность испарения $m$ , кг/ (м <sup>2</sup> ч)	
Общее время сушки (расчётное) $\tau_{\text{расч}}$ , ч	
Степень отклонения $\varepsilon_{\tau}$ , %	

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1995.– Ч. 1, 400 с.; ч. 2, 368 с.
2. Процессы и аппараты химической технологии. Основы инженерной химии. / Под ред. Н.Н. Смирнова. – СПб.: Химия, 1996. – 700 с.
3. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с.
4. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии. / Скобло А.И. и др. – М.: ООО «Недра–Бизнес–центр», 2000.– 677с.
5. Муштаев В.И., Тимонин А.С., Лебедев В.Я. Конструирование и расчёт аппаратов со взвешенным слоем. – М.: Химия, 1991. – 344с.
6. Павлов К.Ф., Романков Н.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1981. – 560 с.

## ***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

к лабораторным занятиям по дисциплине  
«Технологические процессы и оборудование» для студентов направ-  
ления 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и произ-  
водств

Составители: *доц. А.И. Свидченко, ст. преп. Е.Б. Новоселова, доц.  
А.М. Новоселов*

Рецензент *доц. А.Л. Проскурнин*

Редактор

---

Подписано в печать	Формат 60 x 84 1/16
Уч. изд. л.	Тираж

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»  
Невинномысский технологический институт (филиал)

---

Отпечатано в типографии НТИ  
357108, г. Невинномысск, ул. Гагарина, 1