

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Фурман Владимир Александрович

Должность: И.о. директора Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского  
Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования

Дата подписания: 04.06.2026 10:40:41

Уникальный программный ключ:

1c378726a41fd0143ae5bccc8ba81860b00daa6c

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

## **Методические указания**

по выполнению лабораторных работ

по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств» для студентов

направления подготовки 19.03.04 Технология продукции и организация

общественного питания

направленность (профиль) Технология и организация ресторанного дела

Пятигорск, 2026 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Лабораторная работа № 1.....                                                                                             | 3  |
| Тема: Последовательность проведения технологических операций в технологическом процессе .....                            | 3  |
| Лабораторная работа № 2.....                                                                                             | 9  |
| Тема: Моделирование процессов и аппаратов. Теория подобия .....                                                          | 9  |
| Лабораторная работа № 3.....                                                                                             | 15 |
| Тема: Иллюстрация уравнения Бернулли при установившемся .....                                                            | 15 |
| движении жидкости в напорном трубопроводе .....                                                                          | 15 |
| Лабораторная работа № 4.....                                                                                             | 21 |
| Тема: Изучение режимов движения жидкости .....                                                                           | 21 |
| Лабораторная работа № 5.....                                                                                             | 24 |
| Тема: Изучение процесса осаждения в поле силы тяжести. ....                                                              | 25 |
| Лабораторная работа № 6.....                                                                                             | 28 |
| Тема: Изучение процесса осаждения в центробежном поле. ....                                                              | 28 |
| Лабораторная работа № 7.....                                                                                             | 35 |
| Тема: Экспериментальное определение коэффициентов.....                                                                   | 35 |
| местных сопротивлений .....                                                                                              | 35 |
| Лабораторная работа № 8.....                                                                                             | 41 |
| Тема: Определение коэффициентов расхода .....                                                                            | 41 |
| при истечении жидкости из разных типов насадок. ....                                                                     | 41 |
| Лабораторная работа № 9.....                                                                                             | 49 |
| Тема: Исследование процессов шламового и закупорочного фильтрования с образованием сжимаемых и несжимаемых осадков ..... | 49 |
| Список рекомендуемой литературы .....                                                                                    |    |

## Введение

Методические указания по выполнению лабораторных работ разработан в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования и рабочими программами по курсу «Процессы и аппараты пищевых производств» и предназначен для студентов технологического факультета.

Цель лабораторного практикума – закрепление знаний по курсу, практическое ознакомление с устройством и работой отдельных аппаратов, изучение процессов на действующих аппаратах, практических навыков пуска, испытания и анализа работы аппаратов, а также знакомство с автоматизированной системой измерений в среде LabVIEW.

Студент должен научиться обосновывать рациональные режимы работы аппаратов и после детального изучения процесса уяснить влияние отдельных параметров режима на ход процесса, т.е. уметь выбрать такой режим, который обеспечивает наибольший технико-экономический эффект при высоком качестве продукта.

### Лабораторная работа № 1

**Тема:** Последовательность проведения технологических операций в технологическом процессе

*Цель работы:* 1) ознакомиться с основными понятиями курса;  
2) изучить классификацию основных технологических процессов пищевых производств;  
3) изучить классификацию технологического оборудования;  
4) составить последовательность проведения технологических операций пищевых производств и провести ее анализ на основе изученной классификации;  
5) составить экспликацию оборудования, используемого в данном производстве.

*Приборы и материалы:* технологические справочники, каталоги оборудования, линейка.

### Краткие сведения из теории

Последовательность выполнения технологических операций в пищевых производствах представлено в виде графического изображения технологического процесса. Технологический процесс – это совокупность последовательных действий, проводимых направленно с целью получения из исходного сырья продукта с заданными свойствами. Технологический процесс состоит из

отдельных стадий (операций). Технологическая операция – единичное воздействие на продукт с целью изменения его свойств (мойка, чистка, резани и др.).

Каждая операция осуществляется с помощью машины или аппарата.

Машина – предназначена для проведения механических и некоторых гидромеханических процессов. Машина имеет рабочий орган (нож, лопасть), который механически воздействует на сырье. Рабочий орган приводится в движение от электропривода (пневмопривода, гидропривода). Привод включает в себя двигатель и передающее устройство.

Механизм – устройство, имеющее рабочий орган и передачу (передающее устройство), но не имеющий собственного электродвигателя. Механизм приводится в действие вручную или присоединяется к универсальному приводу.

Агрегат – устройство, выполняющее несколько технологических операций и имеющее несколько рабочих органов.

Автомат – агрегат, выполняющий операции в автоматическом режиме.

Аппарат – устройство для проведения тепловых, массообменных и некоторых гидромеханических процессов. Аппарат воздействует на продукт энергетически (нагревает, охлаждает, сушит, облучает). Многие аппараты имеют встроенные транспортеры для перемещения сырья от загрузочного к разгрузочному бункеру или мешалки для интенсификации основного процесса.

### *Классификация оборудования*

Оборудование классифицируют по следующим признакам: по функциональному назначению; по виду энергоносителя; по структуре рабочего цикла (оборудование периодического и непрерывного действия); по способу обогрева (аппараты с контактным, косвенным и непосредственным нагревом); по степени автоматизации (неавтоматизированное, полуавтоматизированное и автоматизированное оборудование); по конструктивному исполнению.

### *Классификация процессов*

Все технологические процессы (операции) можно подразделить на четыре большие группы: механические, гидромеханические, тепловые и массообменные (диффузионные).

1. Механические процессы направлены на изменение физических свойств сырья, т.е. размеров, формы, плотности, однородности. Движущей силой процессов является сила механического давления или центробежная сила. К механическим процессам относят:

- сортирование – разделение сыпучих сырья по качеству;
- калибрование – разделение сыпучего сырья на группы по размерам;
- дробление – измельчение сырья на частицы заданных размеров, произвольной формы. Дробление осуществляют способами раздавливания, раскалывания, размола, истирания, удара;
- резание – измельчение сырья на частицы заданной формы и размеров; отрезание части сырья от его массива; измельчение волокнистого сырья.

- обработка материалов давлением – отжатие жидкости из влажного сырья; получение кускового продукта из сыпучего сырья; формование пластичных материалов.

2. Гидромеханические процессы – процессы, связанные с перемещением потоков жидкости и газа. Движущей силой процессов является разность давлений.

- мойка сырья и тары;
- перекачивание жидкости по трубопроводам;
- перемешивание в жидких средах – используется для усреднения концентраций и температур; предупреждения расслоения эмульсий и выпадения осадков в суспензиях; интенсификации тепловых, массообменных и биохимических процессов; получения неоднородных систем из нескольких компонентов;
- осаждение – процесс выделения твердых или жидких частиц из жидких или газообразных сред. Движущей силой является разность плотностей частицы и среды. Процесс может протекать в поле силы тяжести, центробежной силы или электростатических сил;
- фильтрование – процесс выделения твердых частиц из жидких или газообразных сред с помощью пористой перегородки (фильтра). Движущей силой процесса является разность давлений по обеим сторонам фильтра;
- ультрафильтрация и обратный осмос – процессы разделения растворов веществ с различной молекулярной массой с помощью полупроницаемой мембраны, обладающей избирательной проницаемостью.

3. Тепловые процессы – связаны с изменением теплового состояния сырья. Движущей силой процессов является разность температур. Целями тепловых процессов могут быть биохимические изменения в сырье (денатурация белков, карамелизация сахаров, клейстеризация крахмала, меланоидинообразование) и прекращение жизнедеятельности микроорганизмов. К тепловым процессам относят: нагревание, охлаждение, испарение, конденсацию, выпаривание (процесс сгущения растворов путем испарения растворителя при кипении).

4. Массообменные (диффузионные) процессы – связаны с переходом какого-либо вещества (целевого компонента) через границу раздела фаз. Движущей силой процессов является разность концентраций целевого компонента в потоке фазы и на ее границе.

- сушка – процесс удаления влаги из сырья путем ее испарения с поверхности;
- адсорбция – процесс поглощения газов, жидкостей и их паров поверхностью твердого тела, в том числе объеме пор.
- абсорбция – процесс поглощения газов, жидкостей и их паров объемом жидкого поглотителя;
- перегонка – разделение истинных растворов путем частичного испарения с последующей конденсацией паров. Процесс основан на различной летучести компонентов;

- ректификация – многократная перегонка;
- экстрагирование – процесс извлечения целевого компонента из растительного сырья с помощью растворителя, обладающего избирательным действием;
- кристаллизация – процесс получения кристаллического продукта из переохлажденного расплава или перенасыщенного раствора путем охлаждения и интенсивного взбивания;
- растворение – процесс, обратный кристаллизации.

### **Порядок выполнения работы**

1. Провести анализ технологии производства пищевого продукта по индивидуальному заданию, предложенному преподавателем.
2. Составить технологическую схему производства процесса производства пищевого продукта и провести ее анализ на основе классификации процессов.
3. Подобрать оборудование, используемое в данном процессе производства, и провести его анализ на основе классификации оборудования.
4. Отчет оформить в соответствии со следующим примером



Таблица 1.1 – Экспликация оборудования

| ОПЕРАЦИЯ           | ПРОЦЕСС           | ОБОРУДОВАНИЕ                                                |
|--------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------|
| просеивание        | механический      | просеиватель «Бурат»                                        |
| дозирование        | механический      | автомукомер, весы                                           |
| растворение        | массообменный     | солерастворитель ХСР-3                                      |
| фильтрование       | гидромеханический | фильтр                                                      |
| замес жидкой опары | гидромеханический | заварочная машина                                           |
| брожение           | биохимический     | заварочная машина<br>ХМЗ-300, корыто<br>брожения Рабиновича |
| замес теста        | гидромеханический | тестомесильная машина<br>А2-ХТБ                             |
| разделка           | механический      | тестоделитель «Кузбасс»                                     |
| укладка            | механический      | тестоукладчик                                               |
| расстойка          | биохимический     | шкаф окончательной<br>расстойки А2-ХРА                      |
| выпечка            | тепловой          | печь ПХС-25М                                                |
| укладка в лотки    | механический      | циркуляционный стол,<br>вагонетки                           |

### Контрольные вопросы

1. Дать классификацию основных процессов пищевых производств.
2. Дать классификацию гидромеханических процессов.
3. Дать классификацию тепловых процессов.
4. Дать классификацию механических процессов.
5. Дать классификацию массообменных (диффузионных) процессов.
6. Дать классификацию оборудования пищевых производств.
7. Что называется технологической операцией, технологическим процессом и технологической схемой?
8. Что называется машиной, аппаратом, агрегатом, механизмом?
9. Как классифицируется оборудование по способу обогрева?

## Лабораторная работа № 2

Тема: Моделирование процессов и аппаратов. Теория подобия

*Цель работы:* 1) Изучение теории подобия;  
2) Изучение критериев подобия;  
3) Изучение метода анализа размерностей.

### **Краткие теоретические сведения**

Расчетные методики должны создаваться на основе знания взаимосвязи различных параметров, характеризующих процесс и их влияния на скорость протекания процесса. Существует два основных метода изучения объектов: метод прямого эксперимента и аналитический метод.

Метод прямого эксперимента заключается в создании экспериментальной установки и проведении на ней экспериментов по специальному плану. Достоинством является получение точного конкретного результата; недостатками - значительные затраты времени, материальных и трудовых ресурсов, производственных площадей, невозможность предсказания поведения объекта в измененных условиях или обобщения полученных результатов для других объектов.

Аналитический метод заключается в выводе дифференциальных уравнений математической физики, описывающих процесс. Недостатком является практическая невозможность получения точного конкретного результата, а достоинством - описание целого класса явлений. Достоинства того и другого метода объединяет теория подобия.

Теория подобия – это учение о способах создания моделей, правилах проведения на них экспериментов, обработки результатов в виде расчетных зависимостей и определенных границ применимости этих расчетных зависимости.

Моделированием называют изучение объекта по его модели с целью предсказания поведения этого объекта в промышленных условиях. К моделям предъявляют следующие требования:

1. модель должна быть адекватна к реальному объекту, т.е. воспроизводить его существенные характеристики;
2. модель должна иметь существенно меньше габариты, вес, стоимость;
3. эксперименты на модели должны проводиться быстрее, быть более простыми;
4. должен быть известен алгоритм перевода расчетной зависимости для модели в расчетной зависимости для оригинала.

В настоящее время используются три типа моделей: математические, реальные физические и аналоговые.

Математическая модель представляет собой совокупность дифференциальных алгебраических и иных уравнений, описывающих процесс. Эксперимент на такой модели заключается в определении скорости протекания процесса при всех возможных комбинационных параметрах (с помощью ЭВМ). Достоинством модели является относительно небольшие затраты сырья, материалов, площадей

и простота, внесения изменений в эту модель. Недостатком модели является невозможность учета будущих явлений.

Реальная физическая модель представляет собой уменьшенную упрощенную копию оригинала. Достоинство - получение точного результата. Недостатки – весьма большие затраты и сложность внесения изменений в эту модель.

Аналоговые модели отличаются от реального объекта по своей физической сущности, но описываются аналогичными дифференциальными уравнениями.

Результаты, полученные на модели можно распространить на реальный объект в том случае, если сама модель и происходящий в ней процесс подобны реальным.

Подобными называются явления, происходящие в геометрически подобных объектах, в которых в сходственных точках системы, в сходственные моменты времени одноименные параметры пропорциональны. Геометрически подобными называются объекты, в которых все углы равны, стороны пропорциональны. Сходственными точками системы называют точки, отвечающие геометрическому подобию. Сходственными моментами времени называются моменты, пропорционально отстоящие от начала процесса. Одноименными называются величины, имеющие одинаковый физический смысл и размерность.

### *Теоремы подобия*

Три основные теоремы подобия отвечают на три основных вопроса:

- 1) какие величины измерять в эксперименте;
- 2) в каком виде представлять полученные результаты;
- 3) на какие явления можно распространять полученные результаты.

На первый вопрос отвечает теорема Ньютона: подобные явления имеют численно равные критерии подобия.

Критерий подобия – это безразмерный комплекс, состоящий из разноименных величин, имеющих физический смысл. Критерий, как правило, характеризует соотношение движущей силы в процессе с силами сопротивления. Кроме критериев подобия используются симплексы геометрического подобия. Симплекс представляет собой отношение одноименных величин.

На второй вопрос отвечает теорема Федермана-Букингема: любая зависимость между переменными характеризующими процесс может быть представлена в виде зависимости между соответствующими критериями подобия.

Общий вид критериального уравнения

$$K_1 = CK_2^n \cdot K_3^m \cdot K_4^p, \quad (1)$$

где  $K_1$ - определяемый критерий, содержащий искомую величину;

$K_2, K_3, K_4$  – определяющие критерии;

$C$  – числовой коэффициент определяемый экспериментальным путем;

$n, m, p$  – показатели степени, определяющиеся экспериментальным путем.

Критерии формулируются на основе анализа дифференциальных уравнений или методом размерностей. Количество критериев в критериальном уравнении определяет  $\pi$ -теорема:

$$\pi = N - n \quad (2)$$

где  $\pi$  – количество критериев в критериальном уравнении;

$N$  – число параметров характеризующих процесс;

$n$  – число единиц измерения этих параметров в международной системе.

Каждая пара отношения параметров дает в критериальном уравнении один критерий симплекс.

На третий вопрос отвечает теорема Кирпичева-Гукмана: подобные явления описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями при подобных условиях однозначности.

Различают четыре группы условий однозначности:

1. геометрические условия характеризуют конфигурацию объекта и пропорциональность его основных размеров;
2. физические условия однозначности характеризуют свойство объекта рабочих тел;
3. граничные условия характеризуют состояние системы на ее границах и взаимодействие с окружающей средой;
4. временные условия характеризуют состояние системы во времени.

Таблица 2.1 - Основные критерии подобия гидромеханических, тепловых и массообменных процессов

| Критерий                                          | Формула                                     | Основной физический смысл                                                                         |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Критерии гидромеханического подобия            |                                             |                                                                                                   |
| 1. Критерий режима движения (число Рейнольдса)    | $Re = \frac{wl}{\nu} = \frac{Pe}{Pr}$       | Характеризует режим движения жидкости; мера отношения сил инерции и молекулярного трения в потоке |
| 2. Критерий гидравлического подобия (число Фруда) | $Fr = \frac{w^2}{gl} = \frac{Re^2}{Ga}$     | Мера отношения сил инерции и тяжести в потоке                                                     |
| 3. Критерий подобия полей давления (число Эйлера) | $Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}$            | Мера отношения сил давления и инерции в потоке. Безразмерная потеря напора жидкости в трубах      |
| 4. Критерий подобия полей свободного движения     | $Ga = \frac{gl^3}{\nu^2} = \frac{Re^2}{Fr}$ | Мера отношения сил тяжести и молекулярного трения                                                 |

|                                                                                |                                                                                             |                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (число Галилея)                                                                |                                                                                             |                                                                                                                                                                         |
| 5. Критерий свободной конвекции (число Архимеда)                               | $Ar = \frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} = Ga \frac{\Delta\rho}{\rho}$ | Характеризует взаимодействие архимедовой силы, возникающей при разности плотности среды и силы вязкого трения                                                           |
| 2. Критерии теплового подобия                                                  |                                                                                             |                                                                                                                                                                         |
| 6. Безразмерный коэффициент теплоотдачи (критерий Нуссельта)                   | $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$                                                             | Характеризует связь между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем в пограничном слое потока                                                                    |
| 7. Критерий подобия температурных и скоростных полей в потоке (число Прандтля) | $Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta_c}{\lambda} = \frac{Pe}{Re}$                               | Характеризует физические свойства теплоносителя (безразмерная величина)                                                                                                 |
| 8. Критерий теплового подобия (число Пекле)                                    | $Pe = \frac{wl}{a} = Re \cdot Pr$                                                           | Мера отношения молекулярного и конвективного переносов тепла в потоке                                                                                                   |
| 9. Критерий тепловой гомохронности (число Фурье тепловое)                      | $Fo = \frac{a \tau}{l^2}$                                                                   | Характеризует связь между скоростью изменения температурного поля, физическими свойствами и размерами тела                                                              |
| 10. Критерий краевого подобия (критерий Био-тепловой)                          | $Bi = \frac{\alpha l_c}{\lambda_{cm}}$                                                      | Мера отношения внутреннего и внешнего термических сопротивлений; характеризует связь между полем температур в твердом теле и условиями теплопередачи на его поверхности |
| 11. Критерий свободной тепловой конвекции (число Грасгофа)                     | $Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \beta \vartheta_c$                                           | Мера отношения сил молекулярного трения и подъемной силы при различии плотностей в отдельных точках неизотермического потока                                            |

|                                                                                                 |                                                 |                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12. Тепловой критерий фазового превращения (критерий Кутателадзе)                               | $Ku = \frac{r}{c\Delta t} = \frac{r}{\Delta i}$ | Мера отношения теплоты фазового превращения к теплоте перегрева или переохлаждения одной из фаз по отношению к температуре насыщения |
| 3. Критерии диффузионного подобия                                                               |                                                 |                                                                                                                                      |
| 13. Безразмерный коэффициент массоотдачи (массообменный критерий Нуссельта, критерий Шервуда)   | $Nu = \frac{\beta l}{D}$                        | Характеризует связь между интенсивностью массоотдачи и концентрационным полем в пограничном слое                                     |
| 14. Критерий подобия скоростных и концентрационных полей в потоке (диффузионное число Прандтля) | $Pr' = \frac{\nu}{D} = \frac{Re'}{Re}$          | Характеризует физические свойства жидкости                                                                                           |
| 15. Критерий диффузионной гомохронности (диффузионное число Фурье)                              | $Fo' = \frac{D\tau}{l^2}$                       | Характеризует связь между скоростью изменения поля концентрации, физическими свойствами, размерами тела                              |
| 16. Критерий краевого подобия (диффузионный критерий Био)                                       | $Bi' = \frac{\beta l_c}{D_c}$                   | Мера отношения внутреннего и внешнего диффузионных сопротивлений                                                                     |
| 17. Критерий диффузионного подобия (массообменное число Пекле)                                  | $Pe' = \frac{\omega l}{D} = Re \cdot Pr'$       | Мера отношения молекулярного и диффузионного вещества в потоке                                                                       |

### Условные обозначения

$\Delta p$  - перепад давления, Па;

$g$  - ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности частицы и среды соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

$\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>К;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/мК;

$l$  - характерный линейный размер системы, м;  
 $\nu$  - кинематическая вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $a$  – температуропроводность,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $\mu$  - динамическая вязкость, Па с;  
 $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кгК);  
 $\tau$  - время, с;  
 $l_c$  – характерный линейный размер тела, м;  
 $\lambda_c$  – коэффициент теплопроводности твердого тела, Вт/(м<sup>2</sup>К);  
 $\beta$  - коэффициент объемного расширения жидкости, 1/К;  
 $\vartheta_c$  - разность между температурами твердой стенки и потока на удалении от стенки, К;  
 $g$  - теплота фазового превращения ( испарения или конденсации );  
 $\beta$  - коэффициент массоотдачи, м/с;  
 $D$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $D_c$  - коэффициент диффузии в твердом теле,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

### Порядок выполнения работы

1. Составляется перечень независимых факторов, определяющих явлений.
2. Выполняются формальные преобразования:
  - Составляется перечень независимых размерностей. Для этого выписывают зависимые и повторяющиеся размерности;
  - Определяют разность между количеством определяющих параметров и количеством их независимых размерностей;
  - Комбинируют определяющие параметры, составляют необходимое количество независимых безразмерных комбинаций, которые являются определяющими критериями. Критерии анализируют с целью идентификации – определения соответствия известным.
3. Связи между критериями устанавливают в одной из удобных для использования форм. Если форма этой связи заранее не известна, рекомендуется представить ее в виде зависимости искомого критерия от произведения других критериев в соответствующих степенях, определяющихся экспериментально.

### Контрольные вопросы

1. Чем различаются аналитический и экспериментальный методы?
2. Охарактеризуйте достоинства и недостатки все типы моделей?
3. Что называется критерием и симплексом подобия?
4. Сформулируйте три теоремы подобия.
5. Перечислите критерии гидромеханического подобия.
6. Перечислите критерии теплового подобия.
7. Перечислите критерии диффузионного подобия.
8. Что называется условиями однозначности?

## Лабораторная работа № 3

### Тема: Иллюстрация уравнения Бернулли при установившемся движении жидкости в напорном трубопроводе

*Цель работы:* 1. Непосредственное наблюдение взаимосвязи между членами уравнения Бернулли и характера их изменения при переходе от одного поперечного сечения трубопровода к другому при изменении расхода воды в трубопроводе;

2. Измерение значений отдельных членов уравнения Бернулли и построение пьезометрической и напорной линий;

3. Использование уравнения Бернулли для тарировки трубчатого расходомера, в качестве которого может служить участок трубопровода с местным сужением поперечного сечения;

4. Определения коэффициента сопротивления трубчатого расходомера.

*Приборы и материалы:* лабораторная установка, пьезометры, трубки Пито, расходомер.

### Краткие теоретические сведения

Установившееся движение – это такое движение, при котором параметры движущейся среды (средняя скорость, гидродинамическое давление) в каждом данном сечении потока не изменяются во времени.

Уравнение Бернулли устанавливает связь между скоростью, давлением и геометрическим положением того или иного поперечного сечения потока.

Применительно к элементарной струйке идеальной жидкости уравнение Бернулли выражает закон сохранения энергии и для любого поперечного сечения струйки имеет вид:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = H = \text{const}$$

где  $z$  – удельная потенциальная энергия положения сечения (геометрический напор), м;

$\frac{p}{\rho g}$  – удельная потенциальная энергия давления (пьезометрический напор), м;

$v$  – скорость движения жидкости в рассматриваемом сечении, м/с;

$\frac{v^2}{2g}$  – удельная кинетическая энергия (скоростной напор), м;

$H$  – полная удельная механическая энергия движущейся жидкости в рассматриваемом сечении потока (полный напор), м.

Для потока реальной (вязкой) жидкости уравнение Бернулли является уравнением баланса энергии, учитывающим её потери, и для двух произвольных поперечных сечений потока записывается следующим образом:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_n \quad (1)$$

где  $z_i$  – высота расположения центра тяжести рассматриваемого сечения над горизонтальной плоскостью сравнения, м;

$p_i$  – давление жидкости в рассматриваемом сечении, Па;

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

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

$\alpha_i$  – корректив кинетической энергии (коэффициент Кориолиса) в рассматриваемом сечении;

$v_i$  – средняя скорость движения жидкости в рассматриваемом сечении, м/с;

$h_n$  – потери полного напора на участке между сечениями 1 и 2, м.

Коэффициент  $\alpha$  показывает, во сколько раз фактическая кинетическая энергия потока в сечении больше кинетической энергии, вычисленной по средней скорости в этом сечении.

При турбулентном режиме движения  $\alpha=1,05\dots1,15$ ; в инженерной практике обычно принимают  $\alpha \approx 1$ .

### Описание экспериментальной установки

Принципиальная схема установки для иллюстрации уравнения Бернулли приведена на рис. 2. Основным элементом установки – это плоский трубопровод переменного сечения 15.

При работе установки вода из приемного бака 12 насосом 11 подается в напорный бак 13, в котором переливная труба 14 поддерживает постоянный уровень воды. Из напорного бака 13 вода поступает в наклонный плоский трубопровод 15 переменного сечения и затем сливается в приемный бак 12; расход воды через трубопровод 15 регулируется краном 16.

В пяти наиболее характерных сечениях трубопровода установлены по две измерительные трубки. Левые трубки 1, 3, 5, 7, 9 являются трубками статического напора (пьезометрические трубки), правые трубки 2, 4, 6, 8, 10 – трубки полного напора (трубки Пито). Каждая пара трубок имеет шкалу для отсчета высоты расположения уровней воды в трубках над осью трубопровода.

Положение линии полного давления и пьезометрической линии вдоль трубопровода 15 относительно плоскости сравнения 0-0 фиксируется с помощью ниток 17; нитки 17 удерживаются каретками.

### Порядок выполнения работы

1. Включить насос 11 и открыть вентиль 18 (вращением против часовой стрелки). Заполнить напорный бак 13 до уровня верхнего сечения переливной трубы 14. Уровни воды в измерительных трубках должны установиться на уровне воды в баке 13 и на одной горизонтальной линии.

2. Плавно открыть на несколько делений шкалы лимба регулировочный кран 16 и добиться, чтобы скоростной напор в самом узком сечении трубопровода 15 (в трубке 6) находился в пределах 20...30 мм. Проверить, обеспечивается ли через трубку 14 перелив воды в напорном баке 13 и при необходимости подрегулировать подачу насоса 11 вентилем 18.

3. Зафиксировать передвижными каретками высоту расположения уровней воды в измерительных трубках и протянуть через каретки нити 17. Нить, пропущенная через верхние каретки, отметит положение линии полного гидродинамического напора, а нить, пропущенная через нижние каретки – положение пьезометрической линии.

4. В таблицу 1 записать показания пьезометров и трубок полного напора, а также число делений на шкале лимба крана 16.

5. Краном 16 установить новый больший расход воды в трубопроводе 15 и повторить все действия по п.п 3 и 4.

Всего выполнить три опыта при трех различных расходах воды. При проведении опытов необходимо следить за постоянством высоты уровня воды в напорном баке.

Таблица 3.1. - Результаты измерений

| №,<br>п/п | Показания пьезометров и трубок полного напора $h$ , мм |   |   |   |   |   |   |   |
|-----------|--------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|
|           | 1                                                      | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|           |                                                        |   |   |   |   |   |   |   |
|           |                                                        |   |   |   |   |   |   |   |
|           |                                                        |   |   |   |   |   |   |   |

### Обработка экспериментальных данных

1. Для двух первых опытов по данным таблицы 1 в масштабе построить линии полного и пьезометрического напоров по длине трубопровода 15. Дать анализ изменений уровня линий полного и пьезометрического напоров вдоль трубопровода 15 в зависимости от изменения его поперечного сечения.

2. По результатам опытов проводится тарировка трубчатого расходомера, в качестве которого принимается участок трубопровода 15 с местным сужением поперечного сечения (рис.1).

Средняя скорость в поперечных сечениях расходомера:

$$v_1 = \frac{Q}{F}; \quad v_2 = \frac{Q}{f}, \quad (2)$$

где  $Q$  - расход воды через трубопровод;  $F$ ,  $f$  – площади поперечных сечений 1 и 2, соответственно.

Из уравнения Бернулли (1), записанного для двух сечений расходомера, с учетом зависимостей (2) находим расчетный расход воды:

$$Q_p = A\sqrt{\Delta H}, \quad (3)$$

где

$$A = F \sqrt{\frac{2g}{\left(\frac{F}{f}\right)^2 - 1}}; \quad (4)$$

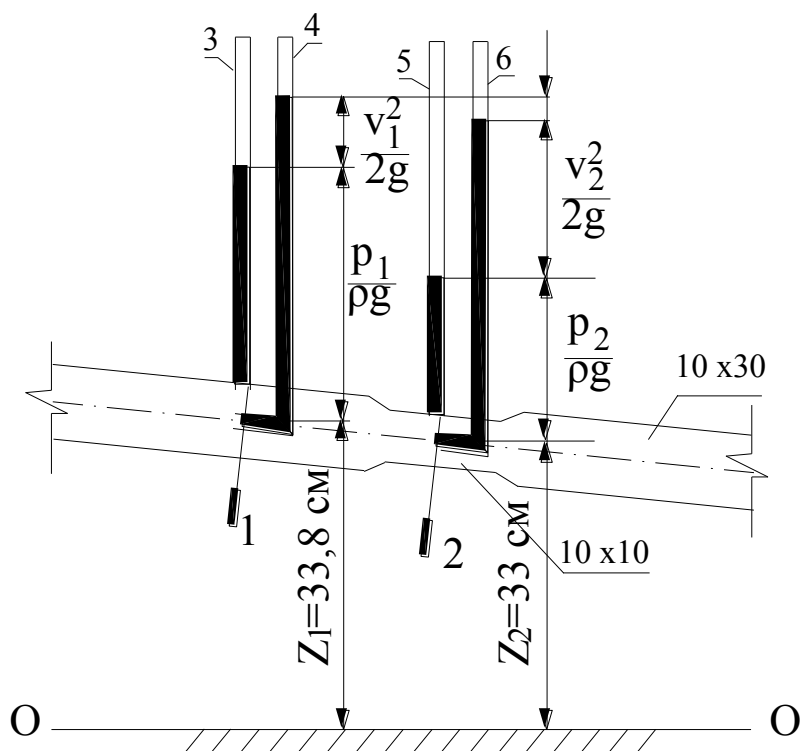


Рисунок 3.1 Расчетная схема трубчатого расходомер (расходомера Вентури)

$$\Delta H = z_1 - z_2 + \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} - \Delta h; \quad (5)$$

значения величин  $z_1$  и  $z_2$  принимаются по рис. 2; величины  $\frac{p_1}{\rho g}$ ;  $\frac{p_2}{\rho g}$  - это показания пьезометров 3 и 5; потеря полного напора  $\Delta h$  определяется по показаниям трубок полного напора 4 и 6:

$$\Delta h = h_4 - h_6. \quad (6)$$

Так как в лабораторной работе трубки полного напора (трубки Пито) 4 и 6 измеряют осевую скорость воды, которая больше средней по сечению скорости, то формула (3) дает завышенное значение расхода. Поэтому для определе-

ния действительного расхода воды  $Q$  в формуле (3) вводится поправочный коэффициент  $k$ :

$$Q = kQ_p = kA\sqrt{\Delta H}, \quad (7)$$

где

$$k = \frac{Q}{Q_p}. \quad (8)$$

Тарировочный коэффициент  $k_i$  в каждом опыте определяется по соответствующим значениям  $Q_i$  и  $Q_{pi}$ . Действительные расходы воды  $Q_i$  принимаем по расходомеру.

Среднее значение тарировочного коэффициента для данного расходомера определяется по формуле:

$$k = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 k_i \quad (9)$$

Результаты расчетов коэффициента  $k$  отражаются в таблице 3.

3. Коэффициент сопротивления  $\zeta_i$  трубчатого расходомера в каждом опыте определяется по выражению:

$$\zeta_i = \frac{\Delta h_i}{\frac{v_i^2}{2g}}; \quad (i=1, 2, 3 \text{ — номер опыта}) \quad (10)$$

$$\Delta h_i = h_2 - h_{10}; \quad (11)$$

$$\frac{v_i^2}{2g} = h_2 - h_1, \quad (12)$$

где  $\Delta h_i$  — местная потеря напора в трубопроводе 15 (потерей напора по длине на трение пренебрегаем), мм вод. ст.;

$h_2, h_{10}$  — показания трубок полного напора 2 и 10, мм вод. ст. (см. рис.3.2);

$v_i^2/2g$  — скоростной напор (скоростная высота), мм вод. ст.;

$h_2; h_1$  — показания трубок 2 и 1 (или 10 и 9) на рис. 1, мм вод. ст.;

$v_i, g$  — тоже, что и в уравнении (1).

Среднее значение коэффициента сопротивления расходомера:

$$\zeta = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \zeta_i \quad (13)$$

Результаты расчета коэффициента сопротивления  $\zeta$  расходомера заносятся в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 - Расчет коэффициента сопротивления расходомера

| № опыта | Потеря напора $\Delta h_i$ ,<br>см | Скоростной напор<br>$\frac{v^2}{2g}$ , см | Коэффициент сопротивления |         |
|---------|------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|---------|
|         |                                    |                                           | $\zeta_i$                 | $\zeta$ |
| 1       | 2                                  | 3                                         | 4                         | 5       |

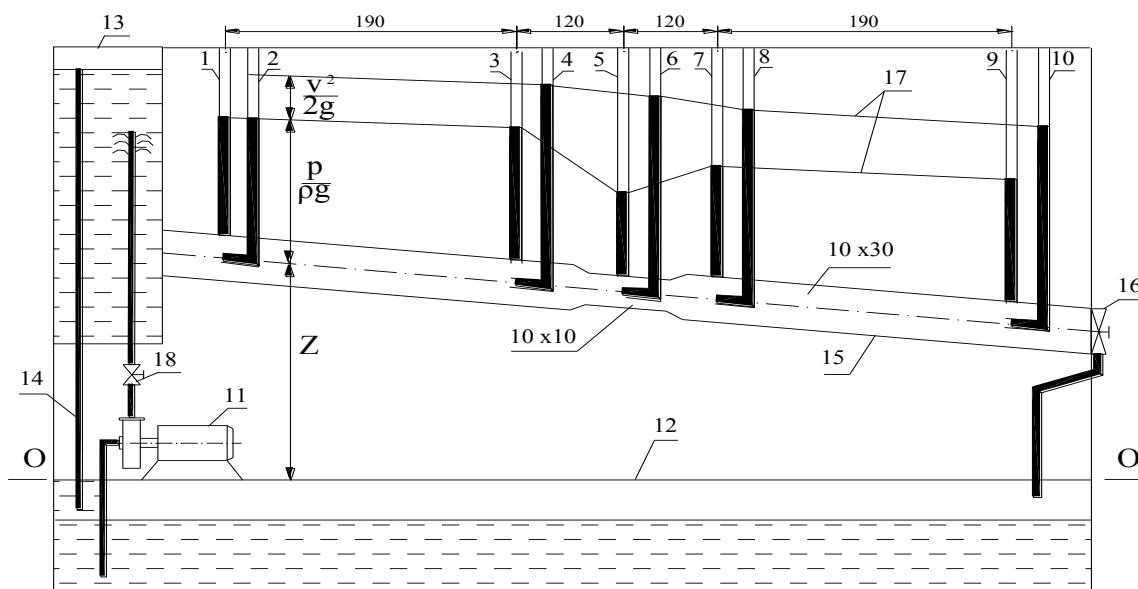


Рисунок 3.2 Принципиальная схема установки

1, 3, 5, 7, 9 – пьезометры; 2, 4, 6, 8, 10 – трубки Пито; 11- насос, 12 – приемный бак; 13 – напорный бак; 14 – переливная труба; 15 – плоский трубопровод переменного сечения; 16 – регулировочный кран; 17 – нити для фиксации полного напора и пьезометрического напора; 18 - вентиль для регулировки подачи насоса 11.

Таблица 3.3 - Расчет тарировочного коэффициента трубчатого расходомера.

| №<br>п/п | Расход<br>$Q$ , м <sup>3</sup> /с | $\frac{P_1}{\rho \cdot g} - \frac{P_2}{\rho \cdot g}$ ,<br>см | h,<br>см | H,<br>см | $\sqrt{\Delta H}$ | A | $Q_{pi}$ ,<br>см/с | $k_i$ | k  |
|----------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------|----------|-------------------|---|--------------------|-------|----|
| 1        | 2                                 | 3                                                             | 4        | 5        | 6                 | 7 | 8                  | 9     | 10 |

### Контрольные вопросы:

1. Как разнятся между собой уравнения Бернулли для реальной и идеальной жидкости?
2. В чем заключается геометрический и физический смысл уравнения Бернулли?
3. Что выражает собой коэффициент Кориолиса?
4. Что называется напором? Какие виды напоров Вы знаете?
5. Как вычислить потери напора по длине трубопровода?
6. Как определить коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  при разных режимах течения жидкости?
7. Объяснить схему лабораторной установки и принцип её действия.

## Лабораторная работа № 4

### Тема: Изучение режимов движения жидкости

*Цель работы:* 1. Наблюдение структуры потока при различных режимах движение жидкости.  
2. Определение режимов движения воды расчетным путем по числу Рейнольдса.

*Приборы и материалы:* лабораторная установка «Гидравлика», секундомер, термометр, указатель уровня.

### Краткие теоретические сведения

При течении жидкости по трубам и каналам могут иметь место два режима движения: ламинарный и турбулентный. При ламинарном режиме жидкость движется отдельными струйками или слоями; траектории частиц жидкости не пересекаются, а линии тока совпадают с траекториями частиц. При турбулентном режиме движения частицы жидкости перемешиваются, их траектории пересекаются и имеют хаотический характер.

Ламинарный режим наблюдается преимущественно при движении жидкостей повышенной вязкости, грунтовых вод, а также при малых скоростях движения жидкости. Ламинарный режим для воды и воздуха возможен при их движении в трубах очень малого диаметра. В большинстве случаев инженерной практики при движении воды имеет место турбулентный режим движения. Наличие или ламинарного или турбулентного режима зависит от скорости течения, вязкости жидкости и геометрических размеров живого сечения потока.

Опыты О. Рейнольдса и других ученых показали, что при постепенном увеличении скорости движение сохраняется ламинарным лишь до какого-то определенного значения скорости, после которого наступает турбулентный режим. И наоборот, при уменьшении скорости турбулентный режим сохраняется до какого-то определенного значения скорости, после которого переходит в ламинарный.

Скорость, при которой происходит смена режимов движения, называется критической скоростью  $v_{кр}$ . Различают нижнюю и верхнюю критические скорости. При нижней критической скорости турбулентное движение переходит в ламинарное, при верхней критической скорости ламинарное движение переходит в турбулентное.

В практике о наличии ламинарного или турбулентного режимов течения судят по значению безразмерного критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{v\ell}{\nu},$$

где  $v$  – средняя по сечению потока скорость течения жидкости, см/с;  
 $\ell$  – характерный линейный размер живого сечения потока, см;  
 $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с.

В качестве характерного линейного размера  $\ell$  принимается гидравлический радиус  $R$ , а для напорного течения в круглой трубе – диаметр  $d$  трубы.

Нижнее критическое число Рейнольдса соответствует значениям  $Re_n = 2300$ , верхнее –  $Re_v = 4000$ . Если  $Re < Re_n$ , то имеет место ламинарный режим движения

жидкости. При  $Re \geq Re_v$  режим движения турбулентный. В области значений  $Re_n \leq Re \leq Re_g$  имеет место неустойчивый режим движения, при котором может быть как ламинарный, так и турбулентный режим движения.

### **Описание экспериментальной установки**

Принципиальная схема установки для изучения режимов движения жидкости приведена на рис.1.

При работе установки подкрашенная вода из резервуара 1 через трубку 8 тонкой струйкой поступает в среднюю часть поперечного сечения стеклянной трубы 9, служащей для визуального наблюдения режимов движения воды. Внутренний диаметр трубы 9 составляет 2 см. В качестве краски используются чернила. В трубу 9 вода поступает из напорного бака 3. Уровень воды в напорном баке поддерживается постоянным за счет слива излишней воды через трубку 5. Скорость движения воды в стеклянной трубке 9 устанавливается краном 13. В зависимости от значения этой скорости имеет место та или иная картина течения подкрашенной струйки жидкости, которая и позволяет судить о режиме движения воды. Из стеклянной трубы 9 вода поступает в мерный бак 10 и далее сбрасывается в канализацию.

### **Порядок выполнения работы**

1. Открыть кран 14 во избежание переполнения мерного бака во время регулирования скорости воды в стеклянной трубе 9.

2. Поворотом рукоятки против часовой стрелки открыть кран 12 и заполнить напорный бак 3 водой из водопровода до верхнего сечения переливной трубы 5.

3. Приоткрыть кран 13 (против часовой стрелки) и установить небольшую скорость течения воды в стеклянной трубе 9.

4. Открывая кран 15 (против часовой стрелки), отрегулировать поступление подкрашенной воды так, чтобы её скорость была примерно одинакова со скоростью воды в стеклянной трубе 9. Струйчатое движение краски в потоке будет свидетельствовать о наличии ламинарного режима в стеклянной трубе 9.

5. Закрыть кран 14 и измерить секундомером время заполнения мерного бака на 10-15 делений по указателю уровня воды 11.

6. Открыть кран 14, и повторить все действия по п.п. 1...5. при новом, несколько большем значении скорости воды в стеклянной трубе 9.

7. При некотором дальнейшем увеличении расхода воды через стеклянную трубу 9 окрашенная струйка начнет колебаться, приобретая волнистый характер с местными размывами. Такое поведение струйки соответствует режиму перехода от ламинарного течения к турбулентному.

В этот момент по п.п. 5 измерить расход воды в трубке, соответствующий нижней критической скорости.

8. Дальнейшее увеличение расхода воды в стеклянной трубе 9 приводит к резкому изменению характера движения: струйка полностью размывается, вода в стеклянной трубке становится равномерно окрашенной – в трубке установится турбулентный режим движения. При этом переходе к развитому турбулентному режиму течения по п. 5 измерить расход воды, соответствующий верхней критической скорости.

9. Провести измерение расхода воды в режиме турбулентного течения со скоростью большей верхней критической.

Результаты измерений в каждом из режимов движения занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 - Результаты измерений

| № опыта | Режим движения | Измерение расхода воды |            | Температура воды, t, °C |
|---------|----------------|------------------------|------------|-------------------------|
|         |                | Объем воды V, мл       | Время τ, с |                         |
| 1       | 2              | 3                      | 4          | 5                       |

Примечания: 1) площадь живого сечения стеклянной трубки  $F=3,14 \text{ см}^2$ ;

2) диаметр трубки  $d = 1,25 \text{ см}$ .

Температура воды измеряется один раз в течение опытов. После проведения опытов закрыть кран подачи воды из водопроводной сети 12, кран подачи краски 15, слить воду из напорного бака 3 и закрыть кран 13.

### Обработка экспериментальных данных

1. По данным таблицы 4.1 находится расход воды через стеклянную трубу 9:

$$Q = \frac{V}{\tau}, \text{ см}^3/\text{с} \quad (1)$$

2. Определяется средняя по сечению скорость движения воды в трубе:

$$v = \frac{Q}{F}, \text{ см/с}, \quad (2)$$

5.3. Определяется соответствующее значение числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (3)$$

где  $d$  - внутренний диаметр стеклянной трубы 9;

$\nu$  - кинематическая вязкость воды, принимается по приложению 4.1.

Результаты обработки опытных данных отражаются в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Результаты обработки эксперимента.

| № опыта | Расход воды Q, м <sup>3</sup> /с | Средняя скорость v, см/с | Коэффициент кинематической вязкости ν, см <sup>2</sup> /с | Число Re | Режим движения |
|---------|----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------|----------|----------------|
|         | 2                                | 3                        | 4                                                         | 5        | 6              |

### Приложение 4 А

#### Коэффициент кинематической вязкости воды ν

|                                                |      |      |      |      |
|------------------------------------------------|------|------|------|------|
| Температура °C                                 | 10   | 20   | 30   | 40   |
| Вязкость $\nu \cdot 10^2$ , см <sup>2</sup> /с | 1,30 | 1,00 | 0,80 | 0,66 |

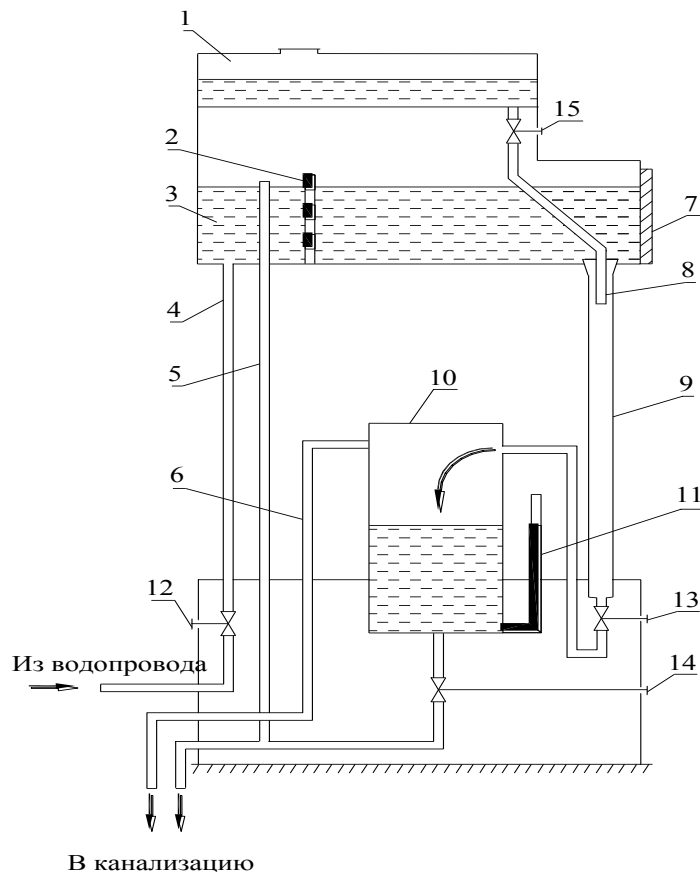


Рисунок 4.1 Схема экспериментальной установки

1 – резервуар с подкрашенной водой; 2 - перегородка перфорированная; 3 – напорный бак; 4 – напорный трубопровод; 5 – переливная трубка; 6 – сливная трубка; 7 – смотровое стекло; 8 – трубка для подачи воды с краской; 9 – стеклянная трубка; 10 – мерный бак; 11 – указатель уровня воды в мерном баке; 12, 13, 14, 15 – регулировочные краны.

### Контрольные вопросы:

1. Чем отличается идеальная жидкость от реальной?
2. Какие существуют режимы движения жидкости и как они определяются?
3. Как определяется коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  при разных режимах течения жидкости?
4. Какие зоны трения различают при установившемся турбулентном режиме течения жидкости?
5. Как происходит распределение скоростей по сечению потока при ламинарном режиме движения жидкости?
6. В каких случаях в инженерной практике сталкиваются с ламинарным и турбулентным режимами течения жидкости?
7. Как происходит распределение скоростей по сечению потока при турбулентном режиме движения жидкости?
8. Описать схему лабораторной установки и принцип её действия.

## Тема: Изучение процесса осаждения в поле силы тяжести.

*Цель работы:* 1) изучить процесс осаждения твердых частиц в поле силы тяжести;  
2) определить скорость осаждения твердых частиц в жидкости;

*Приборы и материалы:* технологические справочники, каталоги оборудования, линейка.

### Краткие теоретические сведения

В случае осаждения мелкодисперсных твердых частиц в газе или жидкости, наблюдающемся при гидравлической и пневматической классификации, газоочистке и разделении суспензий, основной характеристикой процесса является *скорость осаждения*  $\omega_{oc}$

Для расчета скорости осаждения под действием силы тяжести можно использовать общую для всех режимов осаждения зависимость:

$$\omega_{oc} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d_{\tau}(\rho_{\tau} - \rho)g}{\zeta\rho}}.$$

Экспериментально установлены три режима изменения коэффициента сопротивления  $\zeta$  в зависимости от числа Рейнольдса. В первой области — ламинарного осаждения — при  $Re_{oc} < 2$ :

$$\zeta = 24/Re_{oc}.$$

Во второй (часто называемой переходной) области в пределах изменения  $2 < Re_{oc} < 500$ :

$$\zeta = 24/Re_{oc}^{0.6}.$$

В третьей области — развитой турбулентности — в пределах изменения  $500 < Re_{oc} < 20000$ :

$$\zeta \approx 0,44$$

При ламинарном осаждении ( $Re_{oc} < 2$ ) для одиночной сферической частицы (принимая движение мелких частиц с  $d_{\tau} < 0,1$  мм равномерным) скорость осаждения рассчитывают по формуле:

$$\omega_{oc.сф} = d_{\tau}^2(\rho_{\tau} - \rho)g/(18\mu).$$

Эта зависимость носит название *формулы Стокса*. Она справедлива для гидродинамической области чисел Рейнольдса  $10^{-4} < Re_{oc} < 2$ .

Если частицы имеют несферическую форму, то пользоваться зависимостью для расчета  $\omega_{oc}$  нельзя.

В общем случае можно использовать критериальную зависимость:

$$Re = f(Ar, \zeta).$$

Здесь  $Ar$  — критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{d_{\tau}^3 \rho^2 g}{\mu^2} \frac{\rho_{\tau} - \rho}{\rho}.$$

С учетом зависимости уравнение примет вид:

$$Re = Ar/18.$$

При этом критическое значение числа Архимеда, ограничивающее существование ламинарного режима, будет  $Ar \leq 36$ . В переходной области зависимость принимает вид:

$$Re = 0.152 Ar^{0.715}$$

Осаждение в переходной области ограничивается изменениями критерия Архимеда в пределах  $36 < Ar < 8,3 \cdot 10^4$ .

При развитии турбулентном осаждении:

$$Re = 1.74 Ar^{0.5}$$

В тех случаях, когда скорость осаждения задана или известна, для расчета диаметра осаждающихся частиц удобно использовать графическую зависимость  $Ly = f(Ar)$ , где критерий Лященко равен:

$$Ly = \frac{Re^3}{Ar} = \frac{\omega_{oc}^3 \rho^2}{\mu(\rho_\tau - \rho)}.$$

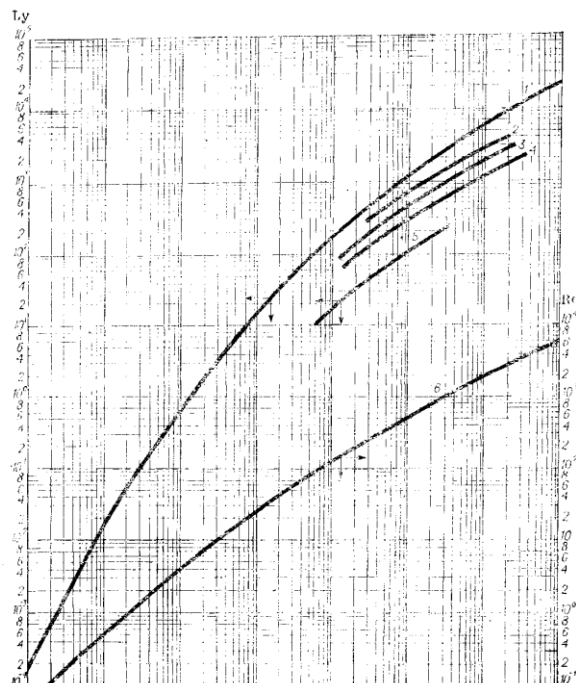
В графической зависимости  $Ly = f(Ar)$  исключен коэффициент сопротивления  $\zeta$ , который для несферических (обычно обрабатываемых в химической технологии) частиц зависит от их формы (округлая, угловая, пластинчатая и т. д.).

Расчеты  $\omega_{oc}$  при известном  $d_r$  для любого режима осаждения приближенно можно вести также с помощью графика на рис.1. Рассчитанная графически скорость осаждения хорошо совпадает с опытными данными для свободно осаждающихся частиц в неограниченном пространстве. Для частиц неправильной формы скорость осаждения обычно меньше, и поэтому скорость, рассчитанную для сферической частицы, необходимо умножить (при отсутствии соответствующих графиков) на поправочный коэффициент формы:

$$\omega_{oc} = \psi \omega_{oc,сф}.$$

Значения фактора (коэффициента) формы  $\psi$  для некоторых геометрических тел ( $h$  — высота;  $r$  — радиус):

| Форма частиц       | $\psi$ | Форма частиц        | $\psi$ |
|--------------------|--------|---------------------|--------|
| Куб                | 0,806  | Цилиндр ( $h=10r$ ) | 0,691  |
| Цилиндр ( $h=3r$ ) | 0,860  | Цилиндр ( $h=20r$ ) | 0,580  |



**Рис. 1. Зависимость критериев  $Re$  и  $Lu$  от критерия  $Ar$  для осаждения одиночной частицы в неподвижной среде:**

1 и 6 — шарообразные частицы; 2 — округленные; 3 — угловатые; 4 — продолговатые; 5 — пластинчатые

При расчете скорости стесненного движения в формулу Стокса вводят поправочный множитель, учитывающий влияние концентрации суспензии и ее реологические свойства.

### **Описание установки**

Установка состоит из трех стеклянных цилиндров ( $d_{ц} \geq 50$  мм), заполненных разными жидкостями. Физические свойства жидкостей приведены в таблице на стенде. Вверху и внизу каждого цилиндра имеются метки, фиксирующие расстояния, которые частицы проходят в процессе осаждения. Замеряя секундомером время, в течение которого частица проходит расстояние между метками, можно определить скорость осаждения частицы.

С целью исключения влияния начального участка ускоренного движения частицы в жидкости верхняя метка расположена на 30—40 мм ниже уровня поверхности жидкости.

### **Порядок выполнения работы**

Частицы сферической и неправильной формы известного или измеренного диаметра (или необходимых геометрических размеров) вводят в сосуд над поверхностью жидкости и аккуратно опускают в жидкость. Секундомером фиксируют время прохождения частицы между метками. Каждый замер дублируют. Результаты опытов заносят в отчетную таблицу.

При вычислении критериев  $Re$ ,  $Ar$  и  $Lu$  используют осредненные значения скорости осаждения  $\omega_{ос}$  и диаметра частиц  $d_t$ .

Для определения скорости осаждения  $\omega_{ос}$  следует провести не менее 5 опытов, в каждом по 3—4 замера.

Если частица в процессе осаждения коснулась стенки цилиндра или к осаждающейся частице прилип пузырек воздуха, результат такого опыта не следует учитывать и опыт необходимо повторить.

### **Обработка экспериментальных данных**

На основе экспериментальных данных:

1. Вычисляют скорость осаждения в каждом замере.
2. Определяют значения критериев  $Re$ ,  $Ar$  и  $Lu$  для каждого опыта.
3. Строят экспериментальные зависимости  $Re = C Ar^n$  и находят коэффициенты

$C$  и  $n$ .

Сравнивают полученные зависимости с расчетными формулами

4. Наносят экспериментальные данные на график  $Lu = f(Ar)$ .

5. Вычисляют с помощью зависимости  $Lu = f(Ar)$  и известной скорости осаждения фактор формы  $\phi$  для заданных некруглых частиц и сравнивают с приведенными выше данными.

## Контрольные вопросы

1. Какие силы действуют на осаждающуюся частицу?
2. Какие физические величины входят в число Рейнольдса для осаждающихся частиц?
3. Какие режимы осаждения известны?
4. Как определить скорость осаждения для несферических частиц?
5. Как определить диаметр частиц, если известна их скорость осаждения?
5. Как влияет несферичность осаждающихся частиц на зависимость  $Ly = f(Gr)$ ?
7. С помощью какой графической зависимости можно вести приближенные расчеты  $\omega_{oc}$  или  $d_r$  для любого режима осаждения?
8. Как можно учесть стесненность движения при расчете  $\omega_{oc}$ ?
9. Как рассчитать площадь осаждения в отстойниках, пылевых камерах, циклонах и осадительных центрифугах?

## Лабораторная работа № 6

Тема: Изучение процесса осаждения в центробежном поле.

*Цель работы:* 1) изучить процесс осаждения твердых частиц в центробежном поле;  
2) определить характеристики работы циклона;

*Приборы и материалы:* технологические справочники, каталоги оборудования, линейка.

### Краткие теоретические сведения

Очистка промышленных газовых потоков от взвешенных в них твердых частиц может, осуществляться, например, путем осаждения твердых частиц под действием различных сил: тяжести, центробежных, электростатических, акустических и др. Одним из наиболее простых и широко распространенных способов является центробежное разделение таких неоднородных систем. В качестве аппаратов-пылеуловителей, в которых можно осуществить этот способ, используют циклоны различных конструкций.

Циклоны конструкции НИИОГАЗа типа ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24 предназначены для сухой очистки газовых потоков от твердых частиц, выделяющихся в некоторых технологических процессах (например, в процессах сушки сыпучих твердых материалов, обжига, агломерации, сжигания топлива и др.), а также аспирационного воздуха в различных отраслях промышленности (химической, нефтехимической, черной и цветной металлургии, промышленности строительных материалов, энергетике и др.).

Их нельзя использовать для улавливания сильно слипающейся пыли, а также в условиях токсичных или взрывоопасных сред.

В зависимости от требований, предъявляемых к очистке газов, циклоны могут иметь самостоятельное применение или использоваться в качестве аппарата первой степени очистки в сочетании с другими газоочистными аппаратами.

Процесс разделения неоднородных систем газ — твердые частицы под действием центробежных сил обуславливается разностью плотностей газового потока и твердых частиц, находящихся во вращательном движении. Центробежные силы, возникающие при этом, обеспечивают большую эффективность процесса по сравнению с процессом разделения, проходящим в поле только сил тяжести. Соотношение этих сил называют *фактором разделения*:

$$f = P_{\text{ц}}/G.$$

Здесь  $P_{\text{ц}}$  — Центробежная сила, отбрасывающая твердую частицу из вращающегося газового потока к стенкам циклона:

$$P_{\text{ц}} = m\omega^2/R.$$

$m$  — масса твердой частицы, кг;  $\omega$  — окружная скорость частицы (условно принимается равной скорости газового потока во входном патрубке циклона), м/с;  $R$  — радиус, циклона, м;  $G = mg$  — сила тяжести.

Фактор разделения характеризует увеличение разделяющей способности в условиях действия центробежной силы:

$$f = m\omega^2/(Rmg) = \omega^2/(Rg).$$

Из выражения видно, что эффективность разделения повышается с увеличением скорости газового потока и уменьшением радиуса циклона. Однако значительное увеличение скорости связано с резким возрастанием гидравлического сопротивления циклона и усилением местных завихрений, срывающих уже осевшие на внутренней поверхности циклона твердые частицы, что приводит к ухудшению очистки газа. Обычно наиболее эффективными являются скорости газа на входе в циклон в интервале 15 ÷ 25 м/с или в расчете на полное поперечное сечение цилиндрической части циклона в интервале 2,5—4,0 м/с.

Работа циклона оценивается по совокупности его основных характеристик:

1) эффективности разделения (степени очистки или коэффициента полезного действия);

2) гидравлического сопротивления (достижение высокой степени очистки при малом гидравлическом сопротивлении).

*Степень очистки (%)* можно рассчитать, зная начальную  $c_H$  и конечную  $c_K$  концентрации твердых частиц в газовом потоке, проходящем через циклон:

$$\eta = \frac{c_H - c_K}{c_H} \cdot 100.$$

или

$$\eta = \frac{G_H - G_K}{G_H} \cdot 100 = \frac{G_{ул}}{G_H} \cdot 100.$$

Здесь  $G_H$ ,  $G_K$ ,  $G_{ул}$  — расход твердых частиц на входе в циклон, на выходе из циклона и уловленных частиц, кг/с.

Степень очистки газового потока зависит от размера и плотности твердых частиц, от плотности и вязкости газового потока, от типа циклона и его геометрических размеров и, конечно, от скорости газового потока на входе в циклон.

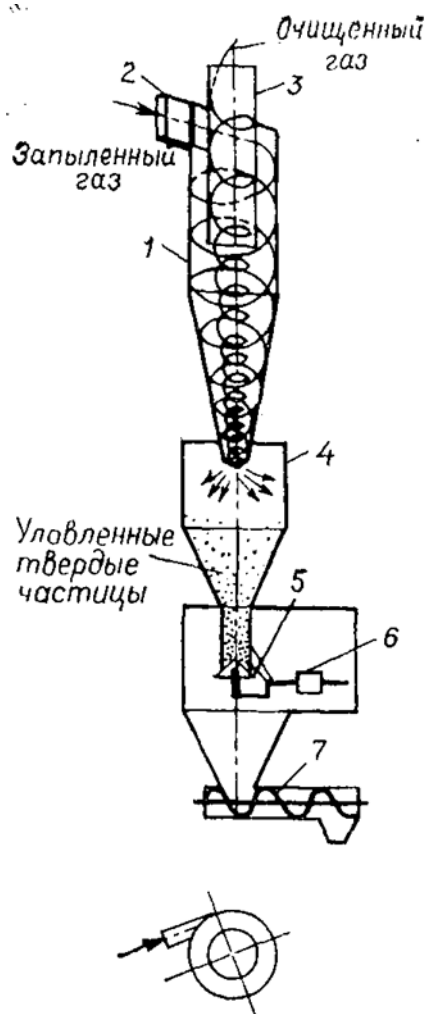
На рис. 1 показана принципиальная схема работы циклона типа ЦН.

Запыленный воздух входит в циклон через тангенциально встроенный патрубок 2 и, приобретая вращательное движение опускается спиралеобразно вниз вдоль внутренней поверхности стенок цилиндрической и конической частей корпуса аппарата. Вращаясь вначале в кольцевом пространстве, образованном цилиндрической частью корпуса циклона и выхлопной трубой 3, а затем в зоне, расположенной ниже торца выхлопной трубы, газовый поток образует внешний вращающийся вихрь. При этом развиваются центробежные силы, под действием которых твердые частицы, находящиеся в газовом потоке и обладающие значительно большей плотностью, чем газ, отбрасываются к стенкам корпуса циклона. Движение твердых частиц по внутренней поверхности циклона к бункеру 4 обусловлено не только влиянием силы тяжести, но и воздействием силы давления газового потока, направленного вниз.

Достигнув нижнего торца конической части корпуса циклона, твердые частицы поступают в бункер 4.

В конической части корпуса циклона газовый шток начинает менять направление и перемещаться вверх к выхлопной трубе, образуя внутренний вращающийся вихрь. Освобожденный от основной массы твердых частиц воздушный поток попадает в выхлопную трубу 3 и, поднимаясь по ней винтообразно вверх, удаляется из циклона.

Оптимальное значение скорости газа на входе в аппарат, обеспечивающей высокую степень очистки, определяют в каждом отдельном случае с учетом свойств разделяемых неоднородных систем (например, фракционного состава твердой фазы,



слипаемости твердых частиц, допустимого уноса твердых частиц и др.) и его гидравлического сопротивления.

Общее гидравлическое сопротивление циклона, установленного, как показано на схеме можно представить как сумму потерь давления:

- 1) при входе в циклон;
- 2) на преодоление сопротивления трения в корпусе циклона;
- 3) при переходе газового потока из внешней зоны циклона большого диаметра во внутреннюю зону (в выхлопную трубу) с поворотом на  $180^\circ$ ; 4) на преодоление сопротивления трения в выхлопной трубе.

Выражая общее гидравлическое сопротивление через динамический напор во входном патрубке и заменяя сумму частных коэффициентов гидравлических сопротивлений общим коэффициентом гидравлического сопротивления циклона  $\zeta_{\text{ц}}$ , получим:

$$\Delta p_{\text{ц}} = \zeta_{\text{ц}} \rho \omega_{\text{вх}}^2 / 2, \quad \omega_{\text{вх}} = V / f_{\text{вх}}$$

Здесь  $\rho$  — плотность газовой среды в рабочих условиях,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\omega_{\text{вх}}$  — скорость газа во входном патрубке,  $\text{м/с}$ ;  $V$  — расход газа,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $f_{\text{вх}}$  — площадь поперечного сечения входного патрубка,  $\text{м}^2$ .

При расчете общего гидравлического сопротивления циклона чаще его определяют как функцию условной скорости газа  $\omega_{\text{ц}}$ , т. е. отнесенной к площади свободного поперечного сечения цилиндрической части корпуса циклона:

$$\Delta p_{\text{ц}} = \zeta'_{\text{ц}} \rho \omega_{\text{ц}}^2 / 2.$$

Условная скорость газа в циклоне, обеспечивающая высокую степень очистки, лежит в пределах  $3 \div 3,5 \text{ м/с}$  и рассчитывается по уравнению:

$$\omega_{\text{ц}} = V / (0,785 D_{\text{ц}}^2).$$

Здесь  $D_{\text{ц}}$  диаметр циклона, м.

Рис.1 Принципиальная схема действия циклона:

1 — корпус циклона; 2 — входной патрубок; 3 — выхлопная труба; 4 — бункер — сборник уловленных твердых частиц; 5 — клапан щелевого затвора; 6 — рычаг клапана; 7 — шнековой транспортер

Значения коэффициентов  $\zeta_{\text{ц}}$  и  $\zeta'_{\text{ц}}$  зависят от конструктивных особенностей циклонов.

Степень улавливания при всех прочих одинаковых условиях зависит от скорости газового потока, а следовательно, и от соотношения  $\Delta p_{\text{ц}}/\rho$ . Наилучшие условия очистки запыленного газа обеспечиваются при  $\Delta p_{\text{ц}} = 500\text{—}750 \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Выше этих значений будет перерасход энергии при практически постоянной степени очистки  $\eta$ , ниже — степень очистки будет заметно снижаться.

## Описание установки

Твердые частицы из бункера (рис.2) с помощью дозатора 2 поступают в трубопровод 3 и образуют с движущимся в этом трубопроводе воздухом запыленный воздушный поток. Уловленные в циклоне твердые частицы собираются в сборнике 8.

Циклон типа ЦН-15 является основным аппаратом в представленной схеме; внутренний диаметр его цилиндрической части 170 мм (входной патрубок имеет размеры 115X35 мм); изготовлен из стали (для визуального наблюдения за процессом циклон может быть выполнен из стекла или из органического стекла при обеспечении условий отвода статического электричества). Циклон соединен с вытяжным вентилятором 11 (с электродвигателем 12) системой трубопроводов — входным всасывающим 3 и выходным нагнетательным 4 (относительно циклона). Расход воздуха регулируется задвижкой 10. В качестве измерительных приборов использованы: для определения расхода воздуха — дифференциальный манометр 7, подключенный к диафрагме Р, для определения гидравлического сопротивления циклона — дифференциальный манометр 6, подсоединенный на входе в циклон и выходе из него. В целях предотвращения запыленности помещения, где размещена установка, на трубопроводе после вентилятора установлен рукавный фильтр 13.

В качестве фильтровального материала могут быть использованы, например, ткани из волокон растительного (лен, хлопок) и животного (шерсть, шелк) происхождения, а также из синтетических волокон (полипропилен, капрон, нейлон, нитрон, лавсан, тефлон, стекловолокно и др.). Из фильтровальных тканей, изготавливаемых на основе волокон естественного происхождения, можно рекомендовать фильтровальное сукно № 2, арт. 20, выпускаемое отечественной промышленностью в соответствии с ГОСТ 6986—69; из искусственных тканей — нитрон, изготавливаемый из полиакрилонитрильных волокон.

При улавливании пылей, способных накапливать статическое электричество, разработан специальный антистатический фильтровальный материал на основе лавсана с добавлением металлических волокон

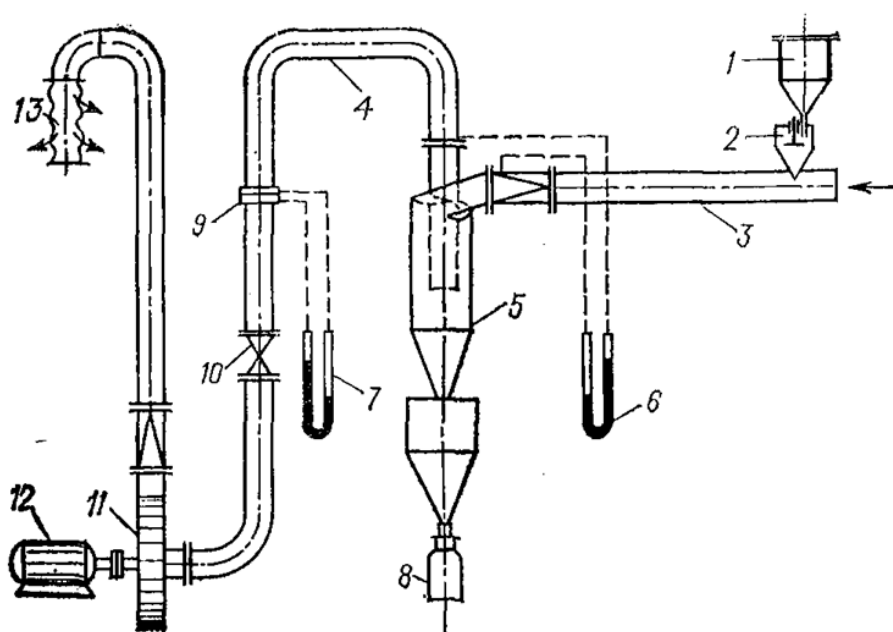


Рис. 2. Схема установки:

1 — бункер с твердой фазой; 2 — дозатор твердой фазы; 3 — всасывающая линия (трубопровод); 4 — нагнетательная линия (трубопровод); 5 — циклон; 6, 7 — 0-образные дифманометры; 8 — сборник

уловленных твердых частиц; 9 — диафрагма; 10 — задвижка; 11 — вентилятор; 12 — электродвигатель; 13 - рукавный фильтр

## Порядок выполнения работы

Исследование работы циклона проводят в два этапа. Сначала определяют гидравлическое сопротивление циклона в зависимости от скорости газового потока, затем — степень очистки в зависимости от скорости газового потока при постоянной концентрации в нем твердых частиц.

В первой части работы исследование проводят на незапыленном воздухе. Включают вентилятор 11 и устанавливают с помощью задвижки 10 необходимый расход воздуха в пределах, заданных преподавателем (6—8 значений расходов). Показания дифманометров 6 и 7 снимают при установленном расходе воздуха одновременно по команде «отсчет» и заносят в отчетную таблицу.

Во второй части работы исследование проводят на: запыленном воздухе при тех же значениях расходов воздуха, что и в первом этапе исследований. С целью сохранения постоянной концентрации твердых частиц в газовом потоке в каждом опыте расход твердой фазы регулируют дозатором путем изменения частоты вращения тарелки дозатора 2. Твердой фазой служит сыпучий материал со средним размером частиц 40 Ц 100 мкм, например можно рекомендовать силикатный катализатор, кварцевый песок, а также другие материалы, отличающиеся по плотности от первых двух. Заданную фракцию твердого материала студенты готовят сами, используя ситовой анализ с применением набора различных стандартных сит.

Перед началом работы проверяют наличие твердого сыпучего материала в бункере 1, настраивают на необходимый расход твердой фазы дозатор 2, предварительно продувают систему, включив на некоторое время вентилятор, затем освобождают от твердого материала сборник 8. После этого можно считать установку подготовленной к проведению исследований.

Включают вентилятор и с помощью регулирующей задвижки 10 устанавливают нужный расход воздуха. Затем включают в работу одновременно дозатор твердой фазы и секундомер. По мере накопления определенного объема материала в сборнике 8 останавливают дозатор с одновременной отсечкой секундомера. Вентилятор продолжает работать в заданном режиме еще некоторое время (3—5 мин), а затем его останавливают. Твердый материал, уловленный из газового потока за время опыта в сборнике 8, взвешивают на технических весах. После этого приступают к подготовке установки для проведения очередного опыта (исследования проводят при 6—8 значениях расхода воздуха). Полученные в каждом опыте данные заносят в отчетную таблицу.

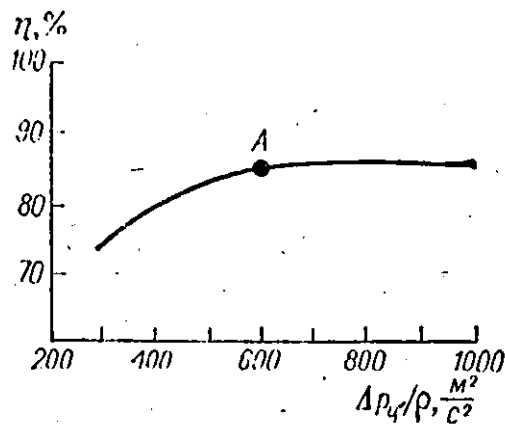


Рис. 3. Зависимость степени очистки п циклона от соотношения  $\Delta p_{\text{ц}}/\rho$

### Обработка экспериментальных данных

По экспериментальным данным отчетной таблицы для каждого опыта:

- 1) определяют расход воздуха ( $V$ , м³/ч) по градуировочному графику дифманометра 7;
- 2) рассчитывают скорость газового потока во входном патрубке циклона  $\omega_{\text{вх}}$  и условную скорость газового потока в циклоне  $\omega_{\text{ц}}$  по уравнениям
- 3) рассчитывают соответствующие коэффициенты гидравлических сопротивлений  $\zeta_{\text{ц}}$  и  $\zeta_{\text{ц}}'$ .
- 4) определяют отношение  $\Delta p_{\text{ц}}/\rho$ ;
- 5) находят расход (кг/с) уловленного твердого материала:  $G_{\text{ул}} = m/\tau$ , где  $m$  — масса (кг) уловленного твердого материала за время работы дозатора  $\tau$ ;
- 6) рассчитывают степень очистки  $\eta$

В отчет о работе должны быть включены: а) задание; б) схема установки со спецификацией; в) отчетная таблица; г) все перечисленные выше расчеты; д) график зависимости  $\Delta p_{\text{ц}}$  от скорости воздуха —  $\omega_{\text{ц}}$  или  $\omega_{\text{вх}}$ ; е) график зависимости  $\eta$  от  $\Delta p_{\text{ц}}/\rho$  (из графика определить оптимальную скорость воздуха, соответствующую высокой степени очистки при малом гидравлическом сопротивлении циклона, см. рис..3, точка  $A$ ).

### Контрольные вопросы:

Какие системы в гидромеханике называют неоднородными?

Что такое пыль?

Какие аппараты применяют для улавливания пыли?

1. Как устроен циклон?
2. За счет чего в циклоне возникает центробежная сила?
3. Что такое фактор разделения?

4. Как влияют диаметр циклона и скорость газового потока на его разделяющую способность?
5. С какой целью в промышленной практике прибегают к применению батарейный циклонов?
6. Что называют степенью очистки или коэффициентом полезного действия циклона?
7. Как определить концентрацию твердых частиц в газовом потоке на выходе из циклона и количество унесенной твердой фазы?
8. Что понимают под гидравлическим сопротивлением  $Ar_{\text{ц}}$  циклона, как его рассчитывают и какие факторы влияют на него?
9. Как рассчитать коэффициент гидравлического сопротивления циклона?
10. Указать последовательность действий при пуске и остановке экспериментальной установки.

## Лабораторная работа № 7

Тема: Экспериментальное определение коэффициентов  
местных сопротивлений

*Цель работы:* 1. Определение экспериментальных значений коэффициентов местных сопротивлений для поворота, резкого расширения и резкого сужения потока.  
2. Сопоставление экспериментальных значений с рекомендуемыми в справочной литературе.

*Приборы и материалы:* лабораторная установка, расходомер, пьезометры, секундомер.

### **Краткие теоретические сведения**

Местные гидравлические сопротивления- это всякого рода запорно-регулирующая арматура, фасонные части трубопроводов, сетки, фильтры. Преодоление жидкостью местных сопротивлений сопровождается потерей ее энергии (напора), т. к. в этих сопротивлениях происходит скачкообразное изменение местных скоростей по значению и направлению.

Местные потери напора определяются по формуле Вейсбаха:

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

где  $\zeta$  - безразмерный коэффициент местного сопротивления;

$v$  - средняя скорость потока, см;

$g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Если значения скорости потока перед участком с местным сопротивлением и после него различны (например, сужение или расширение потока), то потеря напора определяется обычно по большему значению скорости. В справочной литературе для каждого вида местного сопротивления указывается, к какой скорости относится приведенное значение коэффициента местного сопротивления.

Для отдельных простых местных сопротивлений имеются теоретические решения для коэффициента  $\zeta$  (например, внезапное расширение потока).

В большинстве случаев для различных видов местных сопротивлений значения коэффициентов местных сопротивлений  $\zeta$  определяются экспериментально и приводятся в справочной литературе.

### **Описание экспериментальной установки**

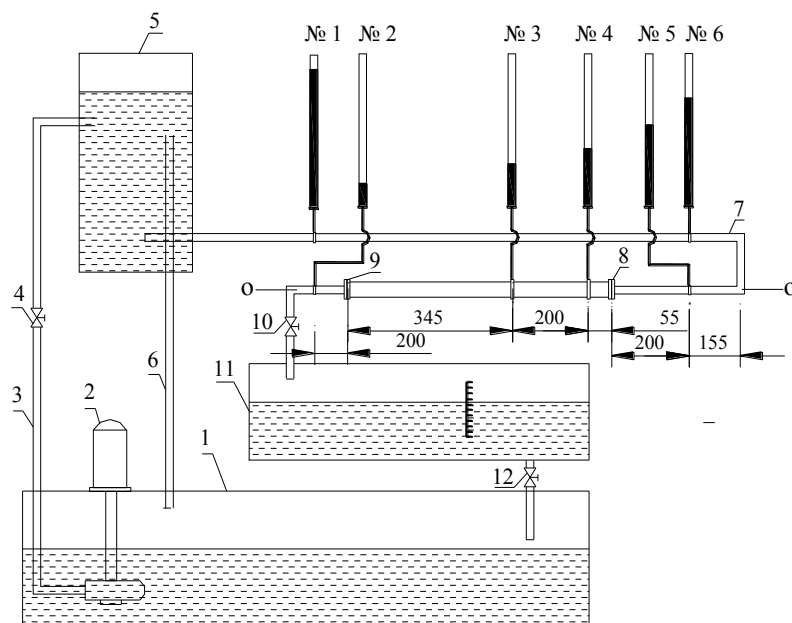
Принципиальная схема установки для определения коэффициентов местных сопротивлений, расположенных по длине трубопровода, приведена на рис. 1.

Во время работы установки вода из приемного бака 1 насосом 2 подается в напорный бак 5 и оттуда поступает в трубопровод с местными сопротивлениями. В баке 5 благодаря наличию сливной трубы 6 поддерживается постоянный уровень. Вода последовательно проходит через два поворота 7, резкое расширение сечения 8 и резкое сужение сечения 9. Меньший внутренний диаметр трубопровода равен 1 см, больший - 2 см.

Для определения потерь напора по длине трубопровода и в его местных сопротивлениях 7, 8, 9 служат измерительные пьезометры № 1, 2, 3, 4, 5, 6. При этом по пьезометрам № 1 и № 6 определяются потери напора по длине трубо-

провода меньшего диаметра, а по пьезометрам № 4 и № 3 – потери давления по длине трубопровода большего диаметра.

После трубопровода с местными сопротивлениями вода поступает в мерный бак 11, по водомерному стеклу которого определяется ее объем. Из мерного бака 11 вода сливается в приемный бак 1.



Для проведения опытов необходим секундомер.

Рисунок 5.1 Схема установки для определения коэффициентов местных сопротивлений.

1-приемный бак, 2-центробежный насос, 3-нагнетательная труба, 4-вентиль регулировки подачи насоса, 5-напорный бак, 6-сливная труба, 7-повороты трубопровода, 8-резкое расширение, 9-резкое сужение, 10-вентиль изменения расхода воды в трубопроводе, 11-мерный бак, 12-сливной вентиль.

### Порядок выполнения работы

1. Включить насос 2, затем открыть вентиль 4, повернув его по часовой стрелке. После заполнения напорного бака 5 до уровня сливного отверстия трубы 6 установить вентилем 4 минимальную подачу насоса 2.

2. Включить пьезометры, проверить “нули” пьезометров.

3. Открыть сливной вентиль 12, повернув его против часовой стрелки (во избежание переполнения мерного бака).

4. Приоткрыть регулирующий вентиль 10, повернув его по часовой стрелке. После того, как уровень воды в пьезометрах установится, записать их показания  $h_1 \dots h_6$ .

5. Закрыть сливной вентиль 12, повернув его по часовой стрелке. По секундомеру измерить и записать время подъема уровня воды в мерном баке 11 на 10-15 делений водомерного стекла.

6. Снова открыть сливной ventиль 12 и регулирующим ventилем 10 установить новый расход воды в трубопроводе. Повторить все действия по п.п. 4 и 5.

Всего следует провести 3 опыта при различных расходах воды с последующим осреднением измеренных значений  $\zeta$  для каждого вида местного сопротивления. Результаты измерений в опытах заносятся в таблицу 1.

Таблица 5.1 - Результаты измерений

| № опыта | Показания пьезометров, см. |       |       |       |       |       | Измерение расхода воды |                  |
|---------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------|------------------|
|         | $h_1$                      | $h_2$ | $h_3$ | $h_4$ | $h_5$ | $h_6$ | Количество делений $n$ | Время $\tau$ , с |
| 1       | 2                          | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8                      | 9                |
| 1       |                            |       |       |       |       |       |                        |                  |
| 2       |                            |       |       |       |       |       |                        |                  |
| 3       |                            |       |       |       |       |       |                        |                  |

Примечания: 1) Площадь поперечного сечения трубопровода меньшего диаметра  $F_1=0,785 \text{ см}^2$ ;

2) площадь поперечного сечения трубопровода большего диаметра  $F_2= 3,46 \text{ см}^2$ ;

3) одно деление водомерного стекла мерного бака соответствует объему  $100 \text{ см}^3$ .

### Обработка экспериментальных данных

1. По данным таблицы 5.1 вычисляется расход воды

$$Q=100 \cdot \frac{n}{\tau}, \text{ см}^3/\text{с} \quad (2)$$

и находится средняя скорость воды в сечениях трубопровода разного диаметра

$$v_i = \frac{Q}{F_i}, \text{ см/с} \quad (i = 1, 2)$$

с последующим определением динамических напоров  $\frac{v_i^2}{2g}$ .

2. Определяется общая потеря напора  $h_n$  в местном сопротивлении.

Из уравнения Бернулли, записанного для двух сечений (перед и после местного сопротивления)

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_n,$$

находим, что

$$h_n = (Z_1 - Z_2) + \left( \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} \right) + \left( \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right)$$

или

$$h_n = (Z_1 - Z_2) + \Delta h + \left( \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad (4)$$

где  $Z$  – высота расположения осей сечений над плоскостью сравнения  $O-O$ ;

$\Delta h$  – разность показаний пьезометров в сечениях до и после участка трубы с местным сопротивлением.

Потери напора при резком расширении потока определяются по пьезометрам № 5 и № 3.

За плоскость сравнения можно принять уровень оси нижнего горизонтального участка трубопровода. Тогда для двух поворотов:  $Z_1=5$  см,  $Z_2=0$ ; для резкого расширения и резкого сужения:  $Z_1=Z_2=0$ .

3. Находятся потери напора по длине  $h_l$  участка, на котором расположено местное сопротивление.

Потери для любого участка трубопровода  $d = 10$  мм

$$h_l = \frac{h_1 - h_6}{1} l, \text{ см}; \quad (5)$$

для участка трубопровода  $d = 20$  мм:

$$h_l = \frac{h_4 - h_3}{0,2} \cdot l, \text{ см}; \quad (6)$$

где  $l$  – длина соответствующего участка, м.

Во избежание значительной погрешности показания пьезометров № 3 и № 4 следует снимать как можно точнее.

3. Потери напора в местном сопротивлении  $h_m$  определяются по выражению:

$$h_m = h_n - h_l, \quad (7)$$

где  $h_n$  – полная потеря напора на участке;

$h_l$  – потеря напора по длине на трение на участке.

4. Значение коэффициента местного сопротивления  $\zeta_i$  в отдельном опыте находится по формуле:

$$\zeta_i = \frac{h_m}{\frac{v_i^2}{2g}} \quad (i=1,2,3). \quad (8)$$

Затем определяется его среднее значение:

$$\zeta = \frac{\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3}{3}. \quad (9)$$

6. Полученные опытные средние значения коэффициентов местных сопротивлений сравниваются с рекомендуемыми значениями, приведенными в справочной литературе (см. приложение А). При этом надо учитывать, что поворот трубы состоит из двух одинаковых поворотов (колен).

Результаты обработки опытных данных и расчетов отражаются в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Результаты обработки эксперимента

| Вид местного сопротивления | Номер опыта | Расход воды $Q$ ,<br>см <sup>3</sup> /с (2)* | Скорость воды,<br>см/с | Динамический напор,<br>см | Показания пьезометров,<br>см | Общая потеря напора в со- | Потери напора на трение по длине участка $h_l$ , см | Потеря напора в местном со- | Коэффициент местного сопротивления, $\zeta$ |
|----------------------------|-------------|----------------------------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|
|----------------------------|-------------|----------------------------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|

|    |   |   | в меньшем сечении<br>$v_1$<br>(3) | в большем сечении<br>(3) | $\frac{v_1^2}{2g}$ | $\frac{v_2^2}{2g}$ | до сопротивления | после сопротивл. |    | d=10<br>(5) | d=20<br>(6) |    | $\zeta_i$ | $\zeta$ | По данным справочника литерат. |
|----|---|---|-----------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----|-------------|-------------|----|-----------|---------|--------------------------------|
| 1  | 2 | 3 | 4                                 | 5                        | 6                  | 7                  | 8                | 9                | 10 | 11          | 12          | 13 | 14        | 15      | 16                             |
| A* |   |   |                                   |                          |                    |                    |                  |                  |    |             |             |    |           |         |                                |
| Б  |   |   |                                   |                          |                    |                    |                  |                  |    |             |             |    |           |         |                                |
| С  |   |   |                                   |                          |                    |                    |                  |                  |    |             |             |    |           |         |                                |

\*) А – резкое расширение; Б – резкое сужение; В – резкий поворот;

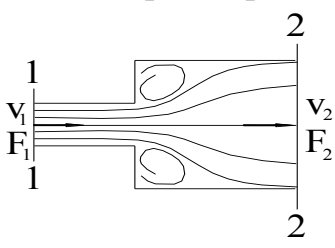
\*\*) – номер формулы

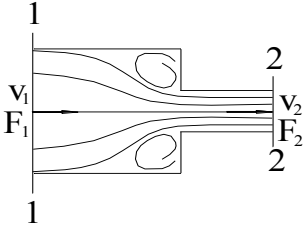
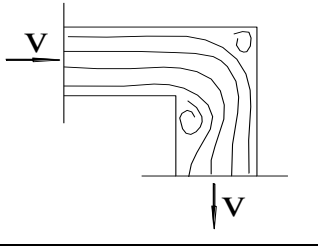
### Контрольные вопросы:

1. Что понимают под местными сопротивлениями?
2. Как определяются потери напора по длине трубопровода и потери напора в местных сопротивлениях?
3. Чем отличаются уравнение Бернулли для идеальной и реальной жидкости?
4. Описать схему лабораторной установки и принцип её действия?

### Приложение 5 А

Справочные значения коэффициентов местных сопротивлений.

| Вид местного сопротивления                                                                                          | Коэффициент местного сопротивления                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                                                   | 2                                                                           |
| <p><u>Резкое расширение</u></p>  | $h_m = \zeta \frac{v_1^2}{2g}$ $\zeta = \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2$ |
| Резкое сужение                                                                                                      | $h_m = \zeta \frac{v_2^2}{2g}$                                              |

|                                                                                                                |                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                               | $\zeta = 0,5 \left( 1 - \frac{F_2}{F_1} \right)$ |
| <p><u>Резкий поворот</u></p>  | $\zeta = 1,2$                                    |

## Лабораторная работа № 8

Тема: Определение коэффициентов расхода  
при истечении жидкости из разных типов насадок.

*Цель работы:* 1) изучение закономерностей процесса истечения жидкостей из различных типов насадок;

2) определение коэффициентов расхода при истечении жидкости из разных типов насадок.

*Приборы и материалы:* лабораторная установка, мерный бак, секундомер, штангенциркуль, линейка.

### Краткие теоретические сведения.

Истечение жидкости из отверстий является одной из важнейших задач гидравлики, над решением которой, начиная с 17 века, работали выдающиеся инженеры и ученые. Основное уравнение гидравлики – уравнение Бернулли – было получено в результате одного из подобных решений.

Задача об истечении сводится к определению скорости истечения и расхода вытекающей жидкости. Наиболее просто и точно она решается в случае, когда напор одинаков по всему поперечному сечению отверстия.

Рассмотрим удовлетворяющий этому требованию случай истечения жидкости из горизонтального отверстия в дне сосуда (рис. 1).

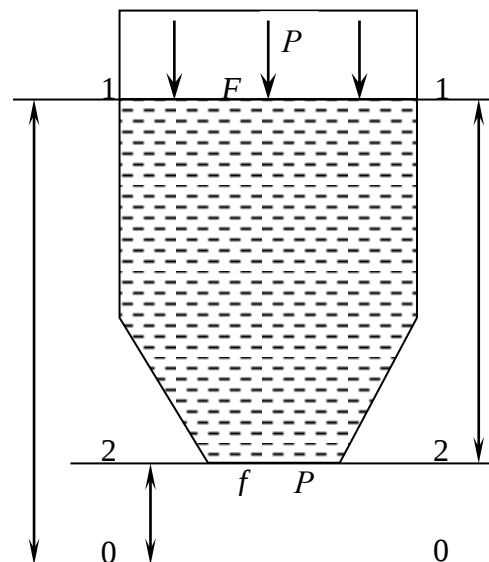


Рисунок 6.1

Составим уравнение Бернулли для двух сечений: сечения 1-1 на свободной поверхности жидкости в сосуде и сечения 2-2 по отверстию.

Площади сечений обозначим через  $F$  и  $f$ , тогда

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

или  $H + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$

где  $P_1, P_2$  – давление жидкости в сечениях 1-1 и 2-2, Па;

$v_1, v_2$  – средние скорости движения жидкостей в указанных сечениях;

$\rho$  – плотность жидкости;

$g$  – ускорение силы тяжести.

Уравнение постоянства расхода для тех же сечений дает:

$$Q = v_1 \cdot F = v_2 \cdot f, \text{ откуда } v_1 = \frac{v_2 \cdot f}{F}$$

Подставив это значение в предыдущее уравнение получим:

$$H + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + (v_2^2 / 2g) \cdot (f / F)^2 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + v_2^2 / 2g,$$

откуда

$$v_m = v_2 = \sqrt{\frac{2g[H + (P_1 / \rho \cdot g) - (P_2 / \rho \cdot g)]}{1 - (f / F)^2}},$$

где  $v_m$  – теоретическая скорость истечения.

Площадь  $F \gg f$ , поэтому в большинстве случаев величиной  $(f / F)^2$  можно пренебречь, что равносильно пренебрежению скоростью  $v_1$  – скоростью подхода, меньшей по сравнению со скоростью истечения  $v_m$ , тогда

$$v_m = \sqrt{2 \cdot g \cdot \left( H + \frac{P_1}{\rho \cdot g} - \frac{P_2}{\rho \cdot g} \right)}.$$

В частном случае, когда  $P_1 = P_2 = P_{атм}$ , сосуд открыт и истечение происходит в атмосферу:

$$v_m = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}.$$

Последнее выражение носит название формулы Торичелли. Таким образом, при истечении идеальной жидкости в атмосферу из отверстия в сосуде с постоянным уровнем и атмосферным давлением на свободной поверхности скорость истечения равна скорости падения твердого тела в пустоте при начальной скорости, равной нулю, с высоты, соответствующей напору жидкости над отверстием. При установившемся плавноизменяющемся движении вязкой (реальной) жидкости уравнение Бернулли для рассматриваемых сечений 1-1 и 2-2 записывается в виде:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + H_m,$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты Кориолиса, учитывающие неравномерность распределения скоростей по сечениям;

$H_m$  – потеря напора при вытекании через отверстие – потеря напора на преодоление местных сопротивлений ( $H_m = \xi \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$ , где  $\xi$  – коэффициент сопротивления при истечении).

Принимаем  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ , тогда с учетом вышесказанного уравнение Бернулли принимает вид:

$$H + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \zeta \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g},$$

или

$$v_\partial = v_2 \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \left( H + \frac{P_1}{\rho \cdot g} - \frac{P_2}{\rho \cdot g} \right)}{1 + \zeta - \left( \frac{f}{F} \right)^2}}.$$

Если, как и в первом случае, пренебречь величиной  $\left( \frac{f}{F} \right)^2$ , то

$$v_\partial = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left( H + \frac{P_1}{\rho \cdot g} - \frac{P_2}{\rho \cdot g} \right)}.$$

В частном случае, когда  $P_1 = P_2 = P_{атм}$ ,

$$v_\partial = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}.$$

Из формулы следует, что действительная скорость истечения всегда несколько меньше теоретической. Это объясняется тем, что некоторая часть энергии, которой обладает находящаяся в сосуде жидкость, затрачивается на преодоление возникающих при её движении гидравлических сопротивлений и на создание скорости идет меньший напор.

Обозначив множитель  $\frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}}$  буквой  $\varphi$ , получим:

$$v_\partial = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H},$$

где  $\varphi$  – коэффициент скорости.

Струя при вытекании через отверстие постепенно сужается и площадь поперечного сечения струи в отверстии  $f_0$  больше площади поперечного сечения её самого узкого сечения  $f$ . Отношение  $\frac{f}{f_0} = \varepsilon$  называют коэффициентом сжатия струи.

Расход жидкости определяют по формуле:

$$Q_\partial = f \cdot v_\partial = f \cdot \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}.$$

Так как  $f = \varepsilon \cdot f_0$ , то  $Q = \varepsilon \cdot f_0 \cdot \varphi \cdot v_\partial$  т.е.

$$Q_\partial = \varepsilon \cdot f_0 \cdot \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}.$$

Обозначив  $\varepsilon \cdot \varphi = \mu$  ( $\mu$  – коэффициент расхода) получим:

$$Q_\partial = \mu \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}.$$

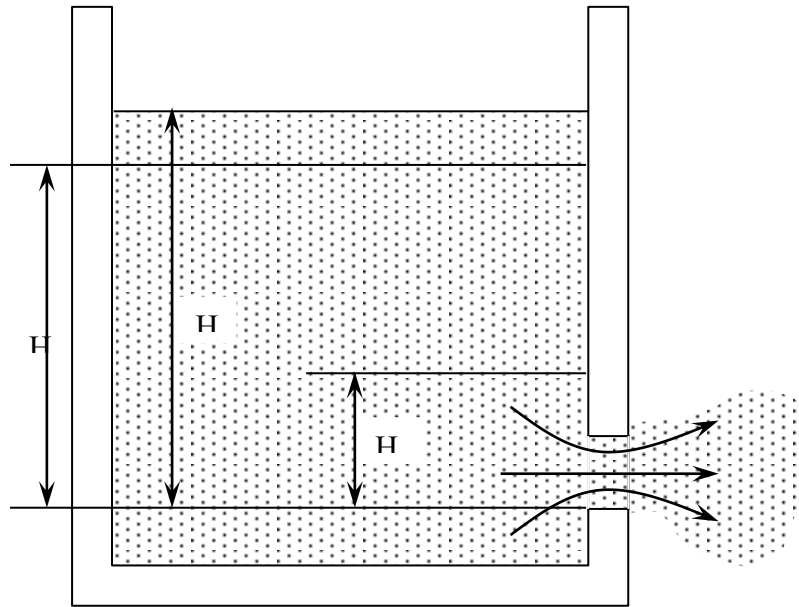


Рисунок 6.2 – Истечение жидкости при перемен-

Коэффициент расхода  $\mu$  показывает, насколько действительный расход жидкости  $Q_0$  при истечении из отверстия уменьшается по сравнению с теоретическим. В идеальном случае  $Q_0 = f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$ , т.е. при истечении жидкости без сжатия струи. Коэффициент  $\mu < 1$  зависит главным образом от степени сжатия струи  $\varepsilon$ . Таким образом,  $\mu = \frac{Q_0}{Q_m}$ .

#### *Истечение жидкости при переменном напоре*

В данном случае движение жидкости является неустановившимся. С достаточной для практики степенью точности можно считать, что в каждый данный момент времени скорость истечения определяется соответствующим этому моменту напором  $H$ , т.е. так же, как и при установившемся движении. Определим время, в течение которого жидкость опустится на  $H_1 - H_2$  (рис. 2).

Возьмем промежуточное положение уровня с напором  $H$ . За время  $dt$  вытечет объем жидкости  $dV$ , равный

$$dV = \mu \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \cdot dt.$$

За то же время  $dt$  напор изменится на  $(-dH)$ , тогда

$$dV = \Omega \cdot (-dH),$$

где  $\Omega$  – площадь поперечного сечения резервуара.

Знак  $(-)$  перед  $dH$  учитывает отрицательный характер приращения  $dH$  при понижении уровня жидкости. Приравняв правые части выражений, получим

$$\mu \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \cdot dt = -\Omega \cdot dH,$$

или

$$dt = -\frac{\Omega \cdot dH}{\mu \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}}.$$

Интегрируя последнее выражение, найдем

$$t = -\int_{H_1}^{H_2} \frac{\Omega \cdot dH}{\mu \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}} = \frac{\Omega}{\mu \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \int_{H_2}^{H_1} \frac{dH}{\sqrt{H}},$$

откуда

$$t = \frac{2 \cdot \Omega \cdot (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\mu \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g}}.$$

При полном опорожнении сосуда, т.е. когда  $H_2 = 0$ , время полного истечения жидкости из сосуда с первоначальным напором  $H_1$  будет равно:

$$t = \frac{2 \cdot \Omega \cdot \sqrt{H_1}}{\mu \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g}}.$$

Если в этой формуле умножить числитель и знаменатель на  $\sqrt{H_1}$ , то получим:

$$t = \frac{2 \cdot \Omega \cdot H_1}{\mu \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_1}} = \frac{2 \cdot V}{Q_0} = \frac{2 \cdot V}{\mu \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_1}},$$

где  $V$  – первоначальный объем жидкости в сосуде.

При определении  $t$  величина  $\Omega$  считалась постоянной. Если бы  $\Omega$  была переменной величиной, то

$$t = \frac{1}{\mu \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \cdot \int_{H_2}^{H_1} \frac{\Omega \cdot dH}{\sqrt{H}}$$

и для интегрирования необходимо было бы знать функциональную зависимость  $\Omega = f(H)$ .

### *Классификация отверстий и насадок*

С целью увеличения расхода жидкости или изменения скорости истечения, дальности полета струи, придания ей монолитности или для её раздробления применяют насадки. Насадкой называется короткая трубка, герметически присоединенная к кромкам отверстия, сделанного в тонкой стенке. Длина насадки составляет обычно  $l = (3 - 5) \cdot d$ , где  $d$  – наименьший внутренний диаметр патрубка. Насадки разделяют на цилиндрические, конические – сходящиеся и расходящиеся, коноидальные.

Конические расходящиеся насадки характеризуются тем, что по сравнению с отверстием в тонкой стенке и цилиндрической насадкой они увеличивают расход и уменьшают скорость истечения жидкости. Увеличение расхода объясняется более значительным вакуумом и уменьшением трения в насадке, уменьшение же скорости идет за счет увеличения живого сечения. Предельным углом конусности  $\beta$  считают  $\beta = 13^\circ$ , т.к. при его последующем увеличении струя будет отрываться от верхней части насадки.

Конические сходящиеся насадки обладают значительным коэффициентом расхода, который имеет наибольшую величину при  $\beta \approx 13^\circ$ . Это объясняется уменьшением сопротивления благодаря менее интенсивному явлению водоворотов. Угол конусности  $\beta$  часто принимают  $\beta = 5^\circ$ , как обеспечивающий наиболее длинную и ровную струю.

Коноидальные насадки, имеющие форму, соответствующую очертанию сжатой струи, по расходу являются наиболее эффективными. Эти насадки увеличивают  $\mu$  за счет уменьшения сопротивления. Коэффициент  $\mu$  в коноидальных насадках весьма близок к единице ( $\mu = 0,98$ ).

Практическое применение насадок весьма велико. Цилиндрические насадки, в особенности насадки Вентури имеют широкое применение: краны, трубопроводы, для пропуска пищевых жидкостей, работающие полным сечением и т.д. Конические расходящиеся насадки используются для замедления подачи жидкостей и увеличения расхода воды, используются, например, в газовых горелках (диффузоры), в гидродушах для охлаждения консервов после стерилизации. Конические сходящиеся насадки применяются в тех случаях, когда требуется дальность вылета струи и сила удара (мочные машины, кондитерские шприцы, дозаторы, конфузоры). Коно-

идальные насадки выполненные по форме струи, исключают её сжатие и сводят к минимуму все потери энергии в струе вытекающей жидкости, применяются в макаронных прессах.

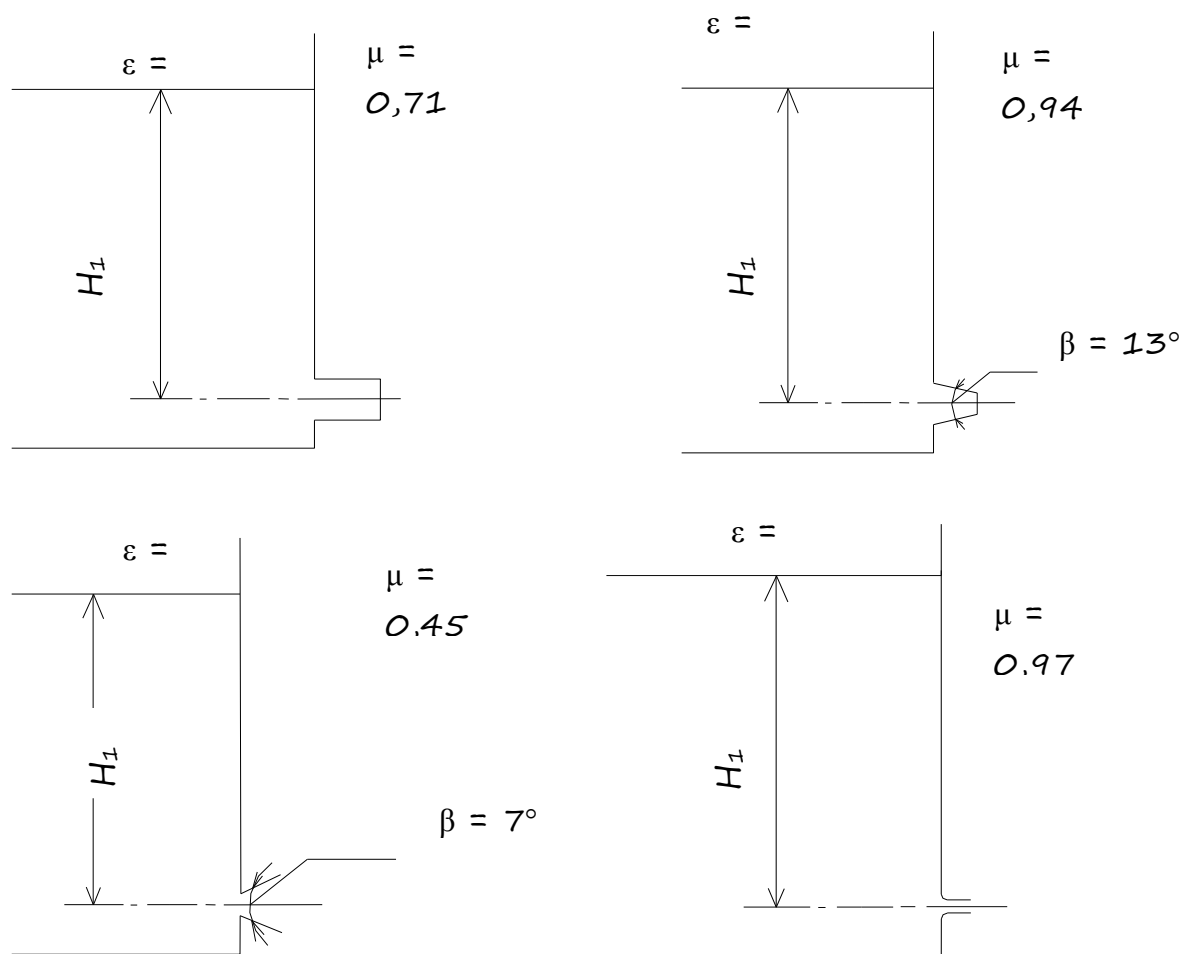


Рисунок 6.3 – Схемы различных видов насадок

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рисунок 6.4) состоит из емкости 1 с вваренными в нее различными насадками 2. В емкость 1 заливается жидкость, постоянный уровень которой поддерживается с помощью переливной трубки 3, трубопровода 4 и циркуляционного насоса 5. Необходимая производительность насоса, исключая преливы и снижение уровня жидкости в сосудах 1 регулируется кранами 7, 8.

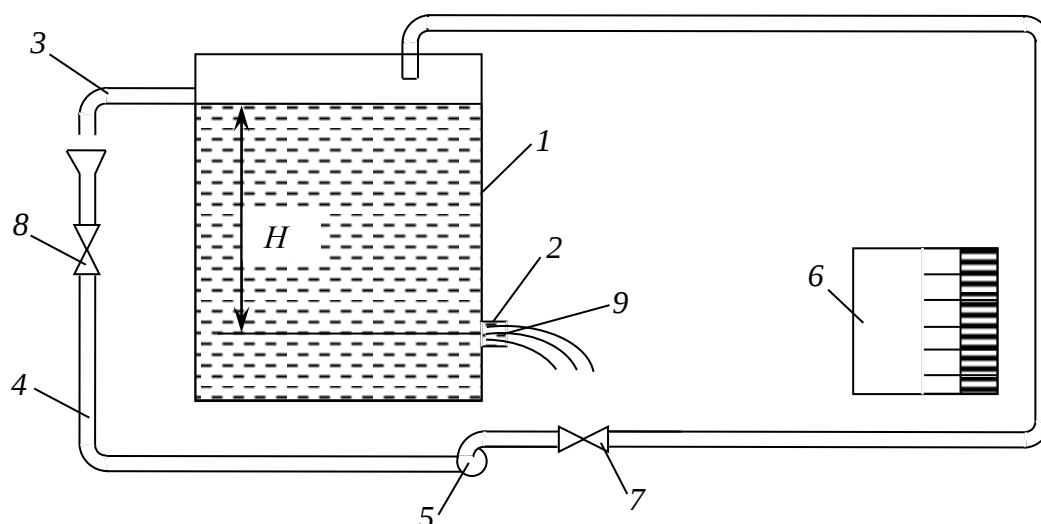
### Порядок проведения лабораторной работы

1. Измеряем высоту уровня жидкости в емкости  $H$  над центром насадка;
2. Открыв пробку насадка 9, измеряем действительный расход жидкости с помощью мерного бачка 6 и секундомера  $Q_o = \frac{V}{\tau}$ , м<sup>3</sup>/с.
3. Определяем теоретическую скорость истечения жидкости из рассматриваемой насадки по формуле  $v_m = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$ ;

Рисунок 6.4 – Схема лабораторной установки.

4. Определяем теоретический расход жидкости по формуле  $Q_m = v_m \cdot f_0$ ,  
где  $f_0 = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$  - площадь поперечного сечения насадки;  
 $d$  – диаметр выходного сечения насадки, м.
5. Для каждого опыта вычисляем коэффициент расхода  $\mu = \frac{Q_o}{Q_m}$ .
6. Сравниваем между собой опытные значения величин  $\mu$  со значениями  $\mu$  приведенными в литературе для аналогичных насадок.
7. Определяются погрешности измерений  $\mu$  в % и делаются выводы об их причинах;
8. Данные замеров и расчетов сводят в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Протокол испытаний.



| №<br>п/п            | Измеренные и вычис-<br>ленные величины    | Обо-<br>значе-<br>ние | Раз-<br>мер-<br>ность | Вид насадки                        |                                            |                          |                             |
|---------------------|-------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
|                     |                                           |                       |                       | Кониче-<br>ская<br>сужаю-<br>щаяся | Кониче-<br>ская<br>расши-<br>ряющая-<br>ся | Цилин-<br>дриче-<br>ская | Ко-<br>но-<br>идал-<br>ьная |
| Измеренные величины |                                           |                       |                       |                                    |                                            |                          |                             |
| 1                   | Высота уровня жидкости<br>в напорном баке | H                     | М                     |                                    |                                            |                          |                             |
| 2                   | Высота уровня жидкости<br>в мерном баке   | h                     | М                     |                                    |                                            |                          |                             |
| 3                   | Размеры мерного бака в<br>плане           | a x b                 | М                     |                                    |                                            |                          |                             |
| 4                   | Диаметр отверстия<br>насадки              | d                     | М                     |                                    |                                            |                          |                             |

|                      |                                               |                           |                 |      |      |      |      |
|----------------------|-----------------------------------------------|---------------------------|-----------------|------|------|------|------|
| 5                    | Время, за которое измеряется расход           | $\tau$                    | с               |      |      |      |      |
| Вычисленные величины |                                               |                           |                 |      |      |      |      |
| 6                    | Объем жидкости в мерном баке                  | V                         | м <sup>3</sup>  |      |      |      |      |
| 7                    | Действительный расход жидкости                | $Q_0 = \frac{V}{\tau}$    | $\frac{м^3}{с}$ |      |      |      |      |
| 8                    | Площадь поперечного сечения отверстия насадка | f <sub>0</sub>            | м <sup>2</sup>  |      |      |      |      |
| 9                    | Теоретическая скорость истечения жидкости     | V <sub>т</sub>            | $\frac{м}{с}$   |      |      |      |      |
| 10                   | Теоретический расход жидкости                 | Q <sub>т</sub>            | $\frac{м^3}{с}$ |      |      |      |      |
| 11                   | Коэффициент расхода действительный            | $\mu_0 = \frac{Q_0}{Q_m}$ | -               |      |      |      |      |
| 12                   | Коэффициент расхода теоретический             | $\mu_m$                   | -               | 0,94 | 0,45 | 0,71 | 0,98 |
| 13                   | Относительная погрешность                     | $\Delta$                  | %               |      |      |      |      |

### Контрольные вопросы:

1. Что называется стационарным потоком? Чем он отличается от нестационарного потока?
2. Что понимают под уравнением неразрывности? На каких допущениях основан логический вывод этого уравнения?
3. Чем отличаются уравнения Бернулли для реальной и идеальной жидкостей?
4. Каков физический смысл коэффициента скорости  $\varphi$ ? Как его определяют?
5. Как определяется коэффициент расхода  $\mu$  и его физический смысл?
6. Что называется насадкой? Какие бывают насадки и для чего их используют (дать характеристику каждому типу насадок)?
7. Как определяют время истечения из насадок при переменном напоре жидкости?
8. В каком оборудовании общепита нашли применение различные типы насадок?

## Лабораторная работа № 9

Тема: Исследование процессов шламового и закупорочного фильтрования с образованием сжимаемых и несжимаемых осадков

*Цель работы:* 1. Изучить процессов фильтрования;  
2. Проиллюстрировать условия перехода шламового фильтрования в закупорочное и обратно  
3. Изучить закономерностей фильтрационных течений с несжимаемым и сжимаемым осадком.  
4. Изучить работу саморазгружающейся фильтрующей центрифуги.  
5. Изучить особенности конструирования закупорочного фильтра для фильтрования воды.

*Приборы и материалы:* лабораторная установка, расходомер, датчик давления, датчик массы, компьютер.

### Краткие теоретические сведения

Фильтрование – это процесс разделения неоднородных систем с твердой дисперсной фазой (суспензий и пылей), основанный на задержании твердых частиц пористыми перегородками.

Шламовое и закупорочное фильтрование – две основные группы, на которые разделяют процессы фильтрования. В процессах первой группы основное фильтрование происходит на шламе, отложившемся поверх фильтрующего материала. Устья пор фильтрующего материала при этом перекрываются частицами дисперсной фазы, и их слой нарастает в процессе фильтрования. По мере его нарастания увеличивается также и сопротивление фильтра. Наличие в фильтруемой суспензии коагулирующих и пептизирующих веществ может во много раз увеличить сопротивление осадка. Шламовое фильтрование реализуется для маловязких жидкостей, содержащих большое количество взвешенных частиц. В этом случае слой шлама на поверхности фильтрующего материала быстро нарастает. В начале процесса, когда слой фильтрата невелик, наблюдается проскок частиц через фильтр.

Закупорочное фильтрование реализуется при малом размере частиц и их небольшом количестве. В связи с малым количеством частиц шлам на поверхности фильтрующего материала не образуется в течение длительного времени. В этом случае единственно эффективным является задерживание частиц внутри пор фильтрующего материала.

Зачастую реализуется комбинированное протекание и шламового и закупорочного фильтрования.

Максимальный размер частиц, которые проходят через фильтр, не задерживаясь, называется порогом фильтрования.

В расчетах фильтрования определяется производительность фильтрования в зависимости от влияющих на нее факторов. Скорость фильтрования ( $Q$ ) рассчитывается как объемный расход жидкости  $\frac{V}{\tau}$  через единицу поверхности ( $F$ ) филь-

тра:

$$Q = \frac{V}{\tau} \cdot \frac{1}{F}.$$

Перепад давлений на фильтре  $\Delta P$  может рассчитываться по одной из трех приведенных далее формул в зависимости от условий течения:

$$\Delta P = \begin{cases} \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} & \text{— для трубопроводов,} \\ V \cdot \frac{\lambda \cdot L \cdot \mu}{d^2} & \text{— для пористых фильтров,} \\ V \cdot \frac{\mu}{d^2} \cdot (\lambda \cdot L + \lambda_{oc} \cdot L_{oc}) & \text{— для фильтров со} \\ & \text{сжимаемым осадком,} \end{cases}$$

где  $V$  – скорость течения жидкости, м/с;

$L$  – длина трубопровода или фильтровальной перегородки, м;

$d$  – диаметр трубопровода или пор фильтра, м;

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

$\mu$  – динамическая вязкость фильтруемой среды, Па·с;

$\lambda$  – коэффициент трения Дарси.

В этом выражении произведение  $(\lambda L)$  представлено суммой соответствующих произведений для чистой фильтрующей перегородки и осадка на ней, для которого соответствующие величины обозначены индексом «ос». Это соответствует представлению суммарного сопротивления фильтра с осадком на нем в виде последовательно соединенных сопротивлений перегородки и осадка.

Если осадок сжимается под действием перепада давлений на нем, это учитывается зависимостью  $\lambda_{oc} = \lambda_{oc,0} \cdot (\Delta P)^n$ , в которой  $n$  – показатель сжимаемости осадка. Если этот показатель не равен нулю, сопротивление осадка увеличивается с увеличением перепада давлений на фильтре со шламом и может достичь весьма больших величин, вплоть до полного закупоривания фильтра.

Закупорочное фильтрование происходит либо до полного закупоривания фильтрующего элемента осадком, либо до уменьшения расхода фильтрата через него на заданную величину.

Представим, что фильтр состоит из капилляров начального диаметра  $d_0$  и длиной  $L$ , которые через интервал времени  $\tau$  уменьшаются за счет отложения на их стенках осадка до диаметра  $d$ . Толщина слоя осадка равна  $\Delta r = \frac{d_0 - d}{2}$ . Если число

капилляров равно  $z$ , и через фильтр прошел фильтрат объемом  $dW$  при концентрации твердых частиц  $C$  в нем, то имеет место баланс объема осадка в виде:

$$dW \cdot C = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot dr.$$

Знак минус в правой части означает, что уменьшение  $r$  приводит к увеличению объема отложившегося осадка  $W$ .

Проинтегрируем это уравнение по времени рассматриваемого процесса, что соответствует интегрированию левой части от нуля до  $W_1$ , а правой – от  $r_0$  до  $r_1$ . Получим:

$$\int_0^{W_1} C \cdot dW = -2 \cdot \pi \cdot L \cdot \int_{r_0}^{r_1} r \cdot dr;$$

$$W_1 \cdot C = \pi \cdot L \cdot (r_0^2 - r_1^2), \quad W_1 = \frac{\pi \cdot L}{C} \cdot (r_0^2 - r_1^2)$$

Скорость (V) движения жидкости в капиллярах связана с перепадом давления ( $\Delta P$ ), их размером (D) и вязкостью ( $\mu$ ) законом Пуазейля:

$$V = \frac{\Delta P \cdot d^2}{32 \cdot \mu \cdot L} = \frac{\Delta P \cdot r^2}{8 \cdot \mu \cdot L}.$$

Из уравнения Пуазейля следует, что в момент начала фильтрования ( $r_0$ ,  $V_0$ ) и в произвольный момент ( $r_1$ ,  $V_1$ ) имеют место соотношения:

$$r_0^2 = 8 \cdot V_0 \cdot \mu \cdot \frac{L}{\Delta P}; \quad r_1^2 = 8 \cdot V_1 \cdot \mu \cdot \frac{L}{\Delta P}.$$

С учетом этих соотношений выражение для  $W_1$  примет вид:

$$W_1 = \frac{8 \cdot \pi \cdot \mu \cdot L^2}{C \cdot \Delta P} (V_0 - V_1).$$

Если фильтрование ведется до полной закупорки, то  $V_1=0$ ,  $r_1=0$ . Тогда

$$W = \frac{8 \cdot \pi \cdot L^2 \cdot \mu}{C \cdot \Delta P} \cdot V_0, \quad V_0 = \frac{\Delta P \cdot r_0^2}{8 \cdot \mu \cdot L},$$

$$W = \frac{\pi \cdot L}{C} \cdot r_0^2 = f \cdot L \cdot \frac{z}{F \cdot C}, \quad f = \pi \cdot r_0^2.$$

Максимальное количество фильтрата  $(Q \cdot \tau)_{\max} = Q \cdot \tau_{\max}$ , которое может быть пропущено через фильтр при закупорочном фильтровании, равно объему пор ( $W_{\pi}$ ), деленному на объемное содержание осадка в жидкости (C):

$$Q \cdot \tau_{\max} \cdot C = W_{\pi}, \quad Q \cdot \tau_{\max} = \frac{W_{\pi}}{C},$$

где Q – объемный расход суспензии, м<sup>3</sup>/с;

$\tau_{\max}$  – время работы фильтра, с;

C – концентрация твердой фазы в суспензии, кг/м<sup>3</sup>.

Для закупорочного фильтрования важен выбор фильтрующего материала. Он должен иметь такие поперечные размеры пор, которые согласуются с размерами задерживаемых частиц. Важен также правильный выбор объемов фильтрующего материала, занятых соответствующими порами. Поясним это.

Если в качестве фильтрующего материала взять мелкопористую пластину, размер пор которой меньше размеров всех задерживаемых частиц, такой фильтр будет работать эффективно, но не долго. Крупные частицы относительно быстро закупорят первый по ходу фильтрата слой пор, и расход через фильтр недопустимо снизится вплоть до полного закупоривания. Более глубоко расположенные слои фильтрующего материала останутся незаполненными фильтруемыми частицами. Это говорит о том, что фильтрующий материал должен специально конструироваться для фильтрования конкретных суспензий.

Фильтрующий материал должен иметь поры, поперечные размеры которых уменьшаются по ходу фильтрата. При этом более мелкие частицы задерживаются

более глубоко расположенными порами.

## **Описание экспериментальной установки**

Экспериментальная установка состоит из отдельных блоков, включающих: иллюстрации шламового и закупорочного фильтрования; изучения сжимаемости осадка; саморазгружающейся фильтрующей центрифуги; фильтров различной проницаемости для очистки воды. Блоки установки действуют независимо друг от друга. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 7.1

1. Блок иллюстрации шламового и закупорочного фильтрования состоит из двух стеклянных цилиндров с перфорированной перегородкой и заслонкой между ними. В нижнем стеклянном цилиндре находятся крупные шарики, имитирующие крупнопористую фильтрующую среду. В верхнем – более мелкие пластмассовые частицы. При открывании заслонки мелкие частицы малым потоком попадают на имитатор фильтрующей среды и фильтруются в нем закупорочным способом, т.е. проходят на большую глубину до тех пор, пока не используется вся емкость фильтрующего слоя. После этого мелкие частицы собираются на поверхности фильтрующего слоя. Повернув блок на  $180^\circ$  при открытой заслонке, восстанавливают исходное состояние блока. При открывании заслонки сразу на большую величину, имитируют поступление на фильтрующий слой высококонцентрированной суспензии. При этом малое количество частиц проходит в фильтрующий слой, а основное их количество образует шлам и задерживается на поверхности фильтрующего слоя. Исходное состояние блок восстанавливается поворотом на  $180^\circ$

2. Блок изучения сжимаемости осадка включает представляет собой автономную систему подачи воды для проливки экспериментальных кювет в виде прозрачных патрубков. Кюветы подключаются к системе питания водой поочередно. Измеряются их напорно-расходные характеристики. Расход жидкости измеряется весовым способом. Измеряя с помощью компьютера массу сосуда с водой, сливающейся в нее из измерительной кюветы, пересчитывают ее численным дифференцированием в расход. Для иллюстрации сжимаемости осадка и влияния сжимаемости на расход воды в кювету между двух перфорированных перегородок засыпан слой резиновой крошки. При определении напорно-расходной характеристики этой кюветы видно, что расход воды уменьшается с увеличением перепада давлений. Это объясняется сжимаемостью осадка. В процессе эксперимента по шкале, нанесенной на кювету, визуально наблюдают сжатие осадка. После окончания эксперимента осадок выталкивается ко входу кюветы шомполом; при этом он восстанавливает свои свойства. Для иллюстрации течения через несжимаемые среды проливается вторая кювета с несжимаемым осадком (песком).

3. Саморазгружающаяся фильтрующая центрифуга демонстрирует фильтрование через вращающееся коническое сито с выбросом осадка по его конической поверхности за счет центробежных сил.

4. Блок фильтров для очистки воды представляет собой три последовательно соединенные фильтра различной проницаемости. В лабораторной работе определяются зависимости степени очистки воды от диаметра пор фильтрующих элементов (картриджей), от емкости фильтров, от перепадов давления на фильтрах и от расхода воды. Делаются выводы о необходимости согласования пористости филь-

тров и размеров фильтруемых частиц из условия рационального заполнения объема фильтра частицами, т.е. из условия повышения его емкости.

### Порядок выполнения работы

Работы с блоками иллюстрации шламового и закупорочного фильтрования и саморазгружающейся центрифуги не требуют измерений и ограничиваются визуальными наблюдениями. Работа с блоком изучения сжимаемости осадка заключается в создании с помощью насоса различных давлений над фильтрующим слоем в одной и второй кюветах и измерении на компьютере расхода воды

Таблица 7.1 – Протокол испытаний.

| Наименование параметров              | Номер фильтра |   |   |
|--------------------------------------|---------------|---|---|
|                                      | 1             | 2 | 3 |
| 1. Давление на входе фильтра Р, бар  |               |   |   |
| 2. Перепад давлений $\Delta P$ , бар |               |   |   |
| 3. Масса воды, прошедшей за 10 с, кг |               |   |   |
| 4. Расход воды G, кг/с               |               |   |   |
| 5. Коэффициент расхода $\mu$         |               |   |   |

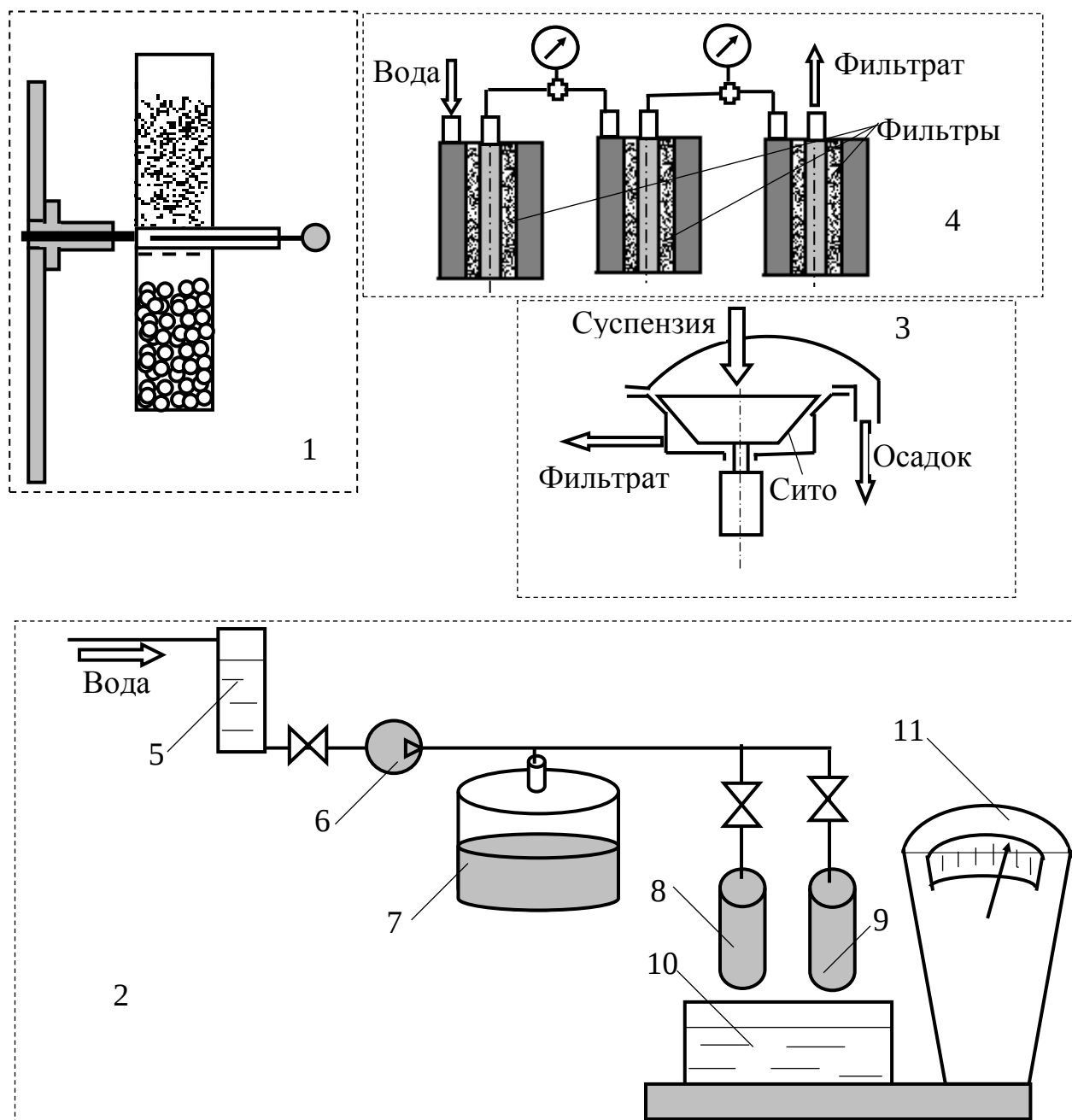


Рисунок 7.1 - Принципиальная схема установки:

1 – блок иллюстрации шламowego и закупорочного фильтрования; 2 – блок изучения сжимаемости осадка; 3 – блок саморазгружающейся фильтрующей центрифуги; 4 – блок водяных фильтров; 5 – бак с водой; 6 – насос; 7 – гидроаккумулятор; 8 – кювета с несжимаемым осадком; 9 – кювета со сжимаемым осадком; 10 – мерная емкость воды; 11 – весы

### Обработка экспериментальных данных

Результаты измерений могут заноситься в таблице или непосредственно обрабатываться компьютером. В результате обработки должен быть получен коэффициент расхода кюветы и его значения должны сравниваться для различных кювет. По данным этих сравнений делается вывод о реализуемых механизмах фильтрования.

Коэффициент расхода определяется по формуле:

$$\mu = \frac{G}{F \cdot \sqrt{2 \cdot 10^5 \cdot \rho \cdot \Delta P}},$$

где  $F$  – площадь наименьшего проходного сечения кюветы,  $\text{м}^2$ ;

$\Delta P$  – перепад давлений на данном проходном сечении, бар;

$10^5$  – перевод единиц измерения давления из бар в Па.

Работа с блоком фильтров очистки воды заключается в расчете массовой скорости фильтрования и коэффициента расхода всех трех фильтров. Обращается внимание на различия цвета картриджей фильтров, что связано с суммарным количеством частиц, задержанных ими от начала эксплуатации. Из этих данных делается вывод о соотношении размеров частиц в фильтруемой воде и пор в картриджах фильтров.

### Контрольные вопросы

1. Какие неоднородные системы разделяются фильтрованием?
2. Какие меры применяются для увеличения эффективности фильтрования?
3. Какой способ разделения неоднородных систем реализуется в саморазгружающейся фильтрующей центрифуге?
5. Как рассчитывается объемная скорость фильтрования?
6. Чем различаются шламовое и закупорочное фильтрование?
7. Возможно ли регенерирование фильтра, отработавшего в закупорочном режиме?
8. Дать сравнительную оценку эффективности фильтрования в фильтрах и фильтрующих центрифугах?
9. Описать лабораторную установку и принцип ее действия.

## **Рекомендуемая литература и интернет - ресурсы:**

### **Основная литература:**

1. Процессы и аппараты пищевых производств [Текст] : учебник / А. Н. Остриков [и др.]; ред. А. Н. Остриков. - СПб. : ГИОРД, 2012. - 616 с.
2. Алексеев, Г. В. Виртуальный лабораторный практикум по курсу "Процессы и аппараты пищевых производств" [Текст] : учеб. пособие / Г. В. Алексеев, И. И. Бриденко, Н. И. Лукин. - СПб.: "Лань", 2011. - 144 с.

### **Дополнительная литература**

1. Процессы и аппараты пищевых производств: учебное пособие/ А. Ф. Апальков - Ростов н/Д: Феникс, 2008.
2. Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств [Текст] : учебник / А. Н. Остриков [и др.]. - СПб. : Изд-во РАПП, 2009. - 408 с.

### **Интернет-ресурсы:**

1. Электронно-библиотечная система IPRbooks
2. Электронная библиотечная система «Университетская библиотека on-line»
3. Электронно-библиотечная система Лань

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

### **Методические указания**

по организации и проведению самостоятельной работы  
по дисциплине: «Процессы и аппараты пищевых производств» для студентов  
направления подготовки 19.03.04 Технология продукции и организация  
общественного питания  
направленность (профиль) Технология и организация ресторанного дела

Пятигорск, 2026 г.

## Содержание

|                                                                            |                                        |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Введение .....                                                             | 59                                     |
| 1.Общая характеристика самостоятельной работы студента .....               | 60                                     |
| 2. План - график выполнения самостоятельной работы .....                   | <b>Ошибка! Закладка не определена.</b> |
| 3.Методические рекомендации по изучению теоретического материала.....      | 60                                     |
| 3.1. Вид самостоятельной работы: самостоятельное изучение литературы ..... | 61                                     |
| 3.2. Вид самостоятельной работы: подготовка к лабораторным занятиям.....   | 61                                     |
| 4. Методические указания.....                                              | 61                                     |
| 5. Методические указания по подготовке к экзамену .....                    | 62                                     |

## **Введение**

Методические указания и задания для выполнения самостоятельной работы студентами по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств» по направлению подготовки бакалавров: 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания.

Методическое пособие содержит весь необходимый материал для выполнения самостоятельной работы по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств».

В данных методических указаниях приведены темы и вопросы для самостоятельного изучения.

## 1.Общая характеристика самостоятельной работы студента

Самостоятельная работа – это вид учебной деятельности, выполняемый учащимся без непосредственного контакта с преподавателем или управляемый преподавателем опосредованно через специальные учебные материалы; неотъемлемое обязательное звено процесса обучения, предусматривающее прежде всего индивидуальную работу учащихся в соответствии с установкой преподавателя или учебника, программы обучения.

На современном этапе самостоятельную работу студента следует разделить на работу с бумажными источниками информации, т.е. учебниками, методическими пособиями, монографиями, журналами и т.д. и электронными источниками информации, т.е. доступ к электронным ресурсам через Интернет.

Сегодня самостоятельную работу студента невозможно представить без использования информационной сети – Интернет. Необходимость использования Интернета возникает не только при подготовке к практическим и семинарским занятиям, но, в большей степени, при написании различных исследовательских и творческих работ. Многие современные монографии, периодические журналы изданы только в электронном виде и с ними можно познакомиться только в Интернете.

**Цели и задачи самостоятельной работы:** формирование способностей к самостоятельному познанию и обучению, поиску литературы, обобщению, оформлению и представлению полученных результатов, их критическому анализу, поиску новых и неординарных решений, аргументированному отстаиванию своих предложений, умений подготовки выступлений и ведения дискуссий.

### Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

| Наименование компетенции                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Код, формулировка компетенции                                                                                                                                    | Код, формулировка индикатора                                                                                                                                                                 | Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов                                                                 |
| ОПК-3. Способен использовать знания инженерных процессов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов | ИД-1 <sub>ОПК-3</sub> Определяет эффективность и надежность процессов и аппаратов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов    | Использует знания инженерных процессов при решении профессиональных задач и эксплуатации современного технологического оборудования и приборов                                      |
| ОПК-5. Способен организовывать и контролировать производство продукции питания                                                                                   | ИД-1 <sub>ОПК-5</sub> Использует теорию основных процессов пищевых производств и движущих сил, под действием которых они протекают для организации и контроля производства продукции питания | Осуществляет контроль и управление производства продукции питания с использованием нормативных и технических документов, норм действующего законодательства и требований стандартов |
|                                                                                                                                                                  | ИД-2 <sub>ОПК-5</sub> Контролирует производство продукции питания с использованием нормативных и технических документов, норм действующего законодательства и требований стандартов          |                                                                                                                                                                                     |

## 3.Методические рекомендации по изучению теоретического материала

### **3.1. Вид самостоятельной работы: самостоятельное изучение литературы**

Изучать учебную дисциплину «Процессы и аппараты пищевых производств» рекомендуется по темам, предварительно ознакомившись с содержанием каждой из них в программе дисциплины. При теоретическом изучении дисциплины студент должен пользоваться соответствующей литературой. Примерный перечень литературы приведен в рабочей программе

Для более полного освоения учебного материала студентам читаются лекции по важнейшим разделам и темам учебной дисциплины. На лекциях излагаются и детально рассматриваются наиболее важные вопросы, составляющие теоретический и практический фундамент дисциплины.

**Итоговый продукт: конспект лекций**

**Средства и технологии оценки: Собеседование**

**Критерии оценивания:** Оценка «отлично» выставляется студенту, если в полном объеме изучен курс данной дисциплины и выполнены практические задания

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если достаточно полно изучен курс данной дисциплины и выполнены практические задания

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, недостаточно если полно изучен курс данной дисциплины и выполнены практические задания

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если отсутствуют знания и практические навыки по данной дисциплине.

#### **Темы для самостоятельного изучения:**

1. Классификация процессов и оборудования.
2. Методы исследования процессов и аппаратов. Основные положения теории подобия
3. Перемешивание в жидких средах
4. Осаждение
5. Фильтрация
6. Классификация сыпучих материалов.
7. Измельчение: дробление.
8. Измельчение: резание.
9. Особенности теплообмена в пищевой аппаратуре.
10. Нагревание и охлаждение твердых тел.
11. Выпаривание. Конденсация.
12. Адсорбция и абсорбция.
13. Сушка.
14. Кристаллизация и растворение.
15. Экстрагирование.
16. Биохимические процессы.
17. Практическое применение теории процессов и аппаратов.

### **3.2. Вид самостоятельной работы: подготовка к лабораторным занятиям**

**Итоговый продукт:** отчет по лабораторной работе

**Средства и технологии оценки:** защита отчета

**Критерии оценивания:** Оценка «отлично» выставляется студенту, если в полном объеме изучен курс данной дисциплины и выполнены лабораторные задания

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если достаточно полно изучен курс данной дисциплины и выполнены лабораторные задания

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, недостаточно, если полно изучен курс данной дисциплины и выполнены лабораторные задания

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если отсутствуют знания и практические навыки по данной дисциплине

## **4. Методические указания**

Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств», направления подготовки 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания.

## **5. Методические указания по подготовке к экзамену**

Процедура проведения **экзамена** осуществляется в соответствии с Положением о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по образовательным программам высшего образования в СКФУ.

В экзаменационный билет включаются три вопроса (один вопрос для проверки знаний и два вопроса для проверки умений и навыков студента).

Для подготовки по билету отводится 30 минут.

При подготовке к ответу студенту предоставляется право пользования справочными таблицами

При проверке лабораторного задания, оцениваются:

- знание параметра;
- последовательность и рациональность выполнения.

### **Рекомендуемая литература и интернет - ресурсы:**

#### **Основная литература:**

1. Процессы и аппараты пищевых производств [Текст] : учебник / А. Н. Остриков [и др.]; ред. А. Н. Остриков. - СПб. : ГИОРД, 2012. - 616 с.
2. Алексеев, Г. В. Виртуальный лабораторный практикум по курсу "Процессы и аппараты пищевых производств" [Текст] : учеб. пособие / Г. В. Алексеев, И. И. Бриденко, Н. И. Лукин. - СПб.: "Лань", 2011. - 144 с.

#### **Дополнительная литература**

1. Процессы и аппараты пищевых производств: учебное пособие/ А. Ф. Апальков - Ростов н/Д: Феникс, 2008.
2. Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств [Текст] : учебник / А. Н. Остриков [и др.]. - СПб. : Изд-во РАПП, 2009. - 408 с.

#### **Интернет-ресурсы:**

1. Электронно-библиотечная система IPRbooks
2. Электронная библиотечная система «Университетская библиотека on-line»
3. Электронно-библиотечная система Лань