

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

**Дисциплина:** Процессы и аппараты химико-фармацевтического производства-1

**Код дисциплины:** РАНФР 2201-1

**Название ОП:** «6В0720100 - Технология фармацевтического производства»

**Объем учебных часов/кредитов:** 180/6

**Курс и семестр изучения:** 2 курс и 3 семестр

**Лабораторные (семинарские) занятия:** 33 часа

Шымкент, 2024 г

|                                                                                                                 |                                                                                  |                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ONTÜSTIK-QAZAQSTAN<br><b>MEDISINA<br/>         AKADEMIASY</b><br>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ    |  | SOUTH KAZAKHSTAN<br><b>MEDICAL<br/>         ACADEMY</b><br>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» |
| Кафедра «Инженерных дисциплин»                                                                                  |                                                                                  |                                                                                                         |
| Методические указания для лабораторных занятий<br>«Процессы и аппараты химико-фармацевтического производства-1» |                                                                                  | 76/11<br>Стр. 2 из                                                                                      |

Методические указания для лабораторных занятий разработаны в соответствии с рабочей программой дисциплины (силлабусом) «Процессы и аппараты химико-фармацевтического производства-1» и обсуждены на заседании кафедры

Протокол № \_\_\_\_\_ « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Зав.кафедрой

Орымбетова Г.Э.

|                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>  </p> <p> <b>ONȚUSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY</b><br/>         «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ       </p> | <p>  </p> <p> <b>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY</b><br/>         АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»       </p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                     |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                     |

## Тема 1: Изучение физических свойств жидкости

**Цель:** Освоение техники измерения температурного расширения, плотности, вязкости и поверхностного натяжения жидкостей.

### Задачи обучения:

#### Студент должен знать:

- основные физические свойства жидкости;
- методы определения коэффициента температурного расширения;
- методы определения плотности жидкости;
- методы определения коэффициента вязкости;
- методы определения коэффициента поверхностного натяжения.

#### Студент должен уметь:

- измерять коэффициент температурного расширения;
- измерять плотности жидкости;
- измерять коэффициент вязкости жидкости;
- измерять коэффициент поверхностного натяжения.

#### Основные вопросы темы:

1. Основные физические свойства жидкости.
2. Методы определения физических свойств жидкости.
3. Приборы для определения физических свойств жидкости.

#### Методы обучения и преподавания:

Студенты должны разобраться в основных физических свойствах жидкости. На лабораторной установке «Капелька»

1. Определить коэффициент температурного расширения термометрической жидкости.
2. Измерить плотность жидкости ареометром.
3. Определить вязкость жидкости вискозиметром Стокса.
4. Измерить коэффициент поверхностного натяжения жидкости сталагмометром.
5. Сравнить полученные экспериментальные данные с их табличными значениями.

## 1.2 Теоретические сведения

**Жидкостями** называют физические тела, обладающие текучестью, т. е. способностью течь под действием весьма малых сил. Процесс течения представляет собой относительное скольжение слоев жидкости (деформацию сдвига). Жидкости разделяют на два класса: капельные, приобретающие при малых объемах форму капли (вода, раствор), и газообразные (воздух, газы).

Основными характеристиками жидкости являются плотность, сжимаемость, температурное расширение, вязкость и поверхностное натяжение.

**Плотность  $\rho$**  – отношение массы  $m$  жидкости к её объему  $V$ , а удельный вес  $\gamma$  – вес  $G$  единицы объема жидкости:

$$\rho = m/V; \quad \gamma = G/V = \rho g,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

**Сжимаемость** – свойство жидкости уменьшать объем под действием давления. Она оценивается **коэффициентом сжимаемости  $\beta_p$** , показывающим относительное уменьшение объема жидкости  $W$  при повышении давления  $p$  на единицу:

$$\beta_p = -(\Delta V/V)/\Delta p.$$

Величина, обратная  $\beta_p$ , называется **модулем объемной упругости жидкости**

$$E_{ж} = 1/\beta_p.$$



|                                                                                                                                                                                                                                   |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <p style="text-align: center;"> ONTÜSTİK QAZAQSTAN<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/> «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ </p>                                                                              |  |
| <p style="text-align: center;">  SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/> АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» </p> |  |
| <p style="text-align: center;">Кафедра инженерных дисциплин</p>                                                                                                                                                                   |  |
| <p style="text-align: center;">Методические указания для лабораторных занятий</p>                                                                                                                                                 |  |

**Температурное расширение** – свойство жидкости изменять объем при нагревании. Характеризуется **коэффициентом температурного расширения**  $\beta_T$ , равным отношению приращению объема  $\Delta V/V$  с изменением температуры  $T$  на один градус при постоянном давлении:

$$\beta_T = (\Delta V/V)/\Delta T.$$

Как правило, при нагревании объем жидкости увеличивается.

**Вязкость** – свойство жидкости сопротивляться относительному скольжению ее слоев. Ее оценивают *динамическим коэффициентом вязкости*  $\mu$ , который измеряется в паскаль-секундах (Па·с) и равен касательному напряжению между соседними слоями, если их относительная скорость перемещения численно равна толщине слоя. **Кинематический коэффициент вязкости**  $\nu$  определяют из формулы

$$\nu = \mu/\rho$$

и измеряют в квадратных метрах на секунду ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) или стоксами ( $1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с}$ ). Коэффициенты вязкости определяются видом жидкости, не зависят от скорости течения и существенно уменьшаются с возрастанием температуры.

**Поверхностное натяжение** – свойство жидкости образовывать поверхностный слой взаимно притягивающихся молекул – характеризуется **коэффициентом поверхностного натяжения**  $\sigma$ , равным силе на единицу длины контура свободной поверхности.

Свойства жидкостей различных  $\rho$ ,  $\beta_p$ ,  $\beta_T$ ,  $\nu$  и  $\sigma$  при  $20^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении (760 мм рт. ст.) указаны в табл. 1.1.

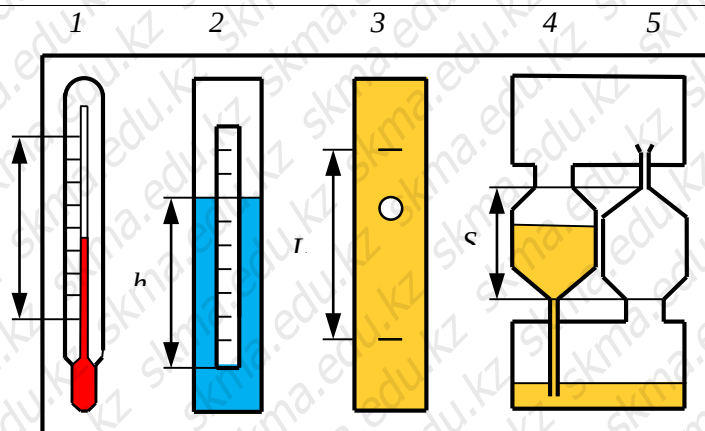
Таблица 1.1 - Свойства жидкостей

| Жидкость         | $\rho$ , $\text{кг}/\text{м}^3$ | $\beta_p$ , $\text{МПа}^{-1}$ | $\beta_T$ , $^\circ\text{C}^{-1}$ | $\nu$ , $\text{м}^2/\text{с}$ | $\sigma$ , $\text{Н}/\text{м}$ |
|------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Вода пресная     | 998                             | 0,00049                       | 0,00015                           | 0,0000010                     | 0,073                          |
| Спирт этиловый   | 790                             | 0,00078                       | 0,00110                           | 0,0000015                     | 0,023                          |
| Масло:           |                                 |                               |                                   |                               |                                |
| моторное М-10    | 900                             | 0,00060                       | 0,00064                           | 0,0008000                     | 0,025                          |
| индустриальное   | 900                             | 0,00072                       | 0,00073                           | 0,0001100                     | 0,025                          |
| трансформаторное | 890                             | 0,00060                       | 0,00070                           | 0,0000300                     | 0,025                          |
| АМГ-10           | 850                             | 0,00076                       | 0,00083                           | 0,0000200                     | 0,025                          |

### 1.3 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка предназначена для изучения физических свойств жидкости и содержит 4 прибора, заключенных в общем корпусе (рис. 1.1). На корпусе указаны названия и параметры приборов, необходимые для обработки экспериментальных данных.

Приборы 3–4 действуют при перевертывании устройства (повороте его в вертикальной плоскости на  $180^\circ$ ). Термометр 1 фиксирует температуру окружающей среды и, вследствие, температуру жидкостей во всех устройствах лаборатории.



1 – термометр; 2 – ареометр; 3 – вискозиметр Стокса; 4 – сталагмометр.

Рисунок 1.1. Схема устройства № 1

#### 1.4. Определение коэффициента температурного расширения термометрической жидкости

**Термометр** имеет стеклянный баллон, капилляр, наполненные термометрической жидкостью, и шкалу. В верхней части капилляра находится воздух. Принцип действия термометра основан на температурном расширении жидкостей. Изменение температуры окружающей среды приводит к соответствующей модификации объема термометрической жидкости и ее уровня в капилляре, который указывает значение температуры.

Коэффициент температурного расширения термометрической жидкости определяется следующим образом, базируясь на воображаемом эксперименте. Предполагается, что температура окружающей среды возросла от нижнего (нулевого) до верхнего (максимального) значения шкалы термометра и уровень жидкости в капилляре повысился на величину  $l$  (рис. 1.1).

1. Подсчитать число градусных делений  $\Delta t$  в шкале термометра и измерить расстояние  $l$  между крайними штрихами шкалы.

2. Вычислить предполагаемое приращение объема термометрической жидкости:

$$\Delta V = \pi r^2 l,$$

где  $r$  – радиус капилляра термометра. Его значение указано на оракторной установке.

3. Учитывая начальный (при  $0^\circ\text{C}$ ) объем термометрической жидкости  $V$  в баллоне (указан на корпусе устройства) найти значение коэффициента температурного расширения

$$\beta_T = \Delta V / (V \cdot \Delta t)$$

и сопоставить его со справочными данными  $\beta_T$  (см. табл. 1.1). Значения используемых и полученных величин занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

| Вид жидкости   | $r$ , см | $V$ , см <sup>3</sup> | $\Delta t$ , °C | $l$ , см | $\Delta V$ , см <sup>3</sup> | $\beta_T$ , °C <sup>-1</sup> | $\beta_T$ при $20^\circ\text{C}$ , °C <sup>-1</sup> |
|----------------|----------|-----------------------|-----------------|----------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Спирт этиловый |          |                       |                 |          |                              |                              |                                                     |

#### 1.5. Измерение плотности жидкости ареометром

**Ареометр** предназначен для нахождения плотности жидкости, методом поплавок. Он имеет форму пустотелого цилиндра, в верхней части нанесена миллиметровая шкала, а в нижней части расположен груз. За счет груза ареометр имеет способность плавать в исследуемой жидкости, находясь в вертикальном положении. По мере погружения ареометра на



|                                                                                                                                                                                        |  |                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p style="text-align: center;">             ОҢТҮСТІК ҚАЗАҚСТАН<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/>             «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ           </p> |  |  <p style="text-align: center;">             SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/>             АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»           </p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                                                                                           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                                                                                                         |  |                                                                                                                                                                                                                                                                    |

определенную глубину, что составляет меру плотности жидкости. Показания считывается со шкалы по нижнему краю мениска жидкости вокруг ареометра, при покое. В обычных ареометрах градуировка шкалы показана по плотности.

В ходе работы необходимо выполнить следующие этапы.

1. Определить глубину погружения  $h$  ареометра по положению нижнего края мениска жидкости вокруг ареометра на его миллиметровой шкале.
2. Вычислить плотность жидкости  $\rho = 4m/(\pi d^2 h)$ , где  $m$  и  $d$  – масса и диаметр ареометра (указаны на корпусе устройства). Эта формула получена путем приравнивания силы тяжести ареометра  $G = mg$  и выталкивающей (Архимедовой) силы  $P_A = \rho g V$ , где объем погруженной части ареометра  $V = (\pi d^2/4)h$ .
3. Сопоставить экспериментальные данные плотности  $\rho$  со справочными данными  $\rho^*$  для заданной жидкости (см. табл. 1.1). Значения используемых и полученных величин свести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

| Вид жидкости | $m$ , г | $d$ , см | $h$ , см | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $\rho^*$ , г/см <sup>3</sup> |
|--------------|---------|----------|----------|----------------------------|------------------------------|
| Вода         |         |          |          |                            |                              |

## 1.6. Определение вязкости вискозиметром Стокса

**Вискозиметр Стокса** имеет несложную конструкцию, включает цилиндрическую емкость, в которой заполнена исследуемая жидкость, и находится шарик. С помощью прибора можно определить вязкость жидкости в зависимости от времени падения шарика вниз следующим образом.

1. Перевернуть лабораторную установку в вертикальной плоскости на 180° и измерить с использованием секундомера время  $\tau$  совершенное шариком определенное расстояние  $l$  между двумя метками, показанные на приборе (см. рис. 1.1). Шарик должен пройти расстояние вдоль оси сосуда не прикасаясь к его стенкам. Эксперимент проводят три раза, а затем определяют среднеарифметическое значение времени  $\tau$ .
2. Рассчитать экспериментальные данные кинематического коэффициента вязкости жидкости:

$$\nu = g d^2 \tau (\rho_{\text{ш}} / \rho - 1) / [18 \cdot l + 43,2 \cdot l \cdot (d/D)],$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $d$ ,  $D$  – диаметры шарика и цилиндрического сосуда;  $\rho$ ,  $\rho_{\text{ш}}$  – плотности жидкости и материала шарика (см. на корпусе установки).

3. Сопоставить экспериментальные данные коэффициента кинематической вязкости  $\nu$  с табличными данными  $\nu^*$  (см. табл. 1.1). Данные свести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

| Вид жидкости | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $t$ , с | $l$ , м | $d$ , м | $D$ , м | $\rho_{\text{ш}}$ , кг/м <sup>3</sup> | $\nu$ , м <sup>2</sup> /с | $\nu^*$ , м <sup>2</sup> /с |
|--------------|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Масло М-10   |                            |         |         |         | 0,02    |                                       |                           |                             |

Опытные значения при иной температуре могут гораздо отличаться от табличных ввиду сильной зависимости его от температуры. Например, для масла М-10 при 20 °С,  $\nu = 0,00080$  м<sup>2</sup>/с, а при 25 °С –  $\nu = 0,00050$  м<sup>2</sup>/с.

## 1.7 Измерение поверхностного натяжения жидкости сталагмометром

**Сталагмометр** служит для нахождения поверхностного натяжения жидкости, за счет метода отрыва капель. Имеет емкость с капилляром. При отрыве капли от капилляра, сила поверхностного натяжения равна ее весу (силе тяжести), и следовательно, находят по плотности жидкости и числу капель, поступившему при опорожнении емкости с определенным объемом.

|                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <p style="text-align: center;"> ONTÜSTİK QAZAQSTAN<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/> «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ </p>                                                                             |  |
| <p style="text-align: center;">  SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/> АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» </p> |  |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                                                                                                                                     |  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                                                                                                                                                   |  |

1. Повернуть лабораторную установку и подсчитать число капель, оторвавшихся от капилляра при снижении уровня жидкости между двумя метками, т. е. полученных из объема высотой  $S$ . Эксперимент провести три раза и рассчитать среднее арифметическое значение числа капель  $n$ .

2. Определить экспериментальные данные коэффициента поверхностного натяжения

$$\sigma = K\rho/n,$$

где  $K$  – постоянная сталагмометра, указана на корпусе лабораторной установки, и сопоставить его с табличными данными этого коэффициента  $\sigma^*$  для испытуемой жидкости (см. табл. 1.1). Данные свести в табл. 1.5.

Таблица 1.5

| Вид жидкости | $K, \text{ м}^3/\text{с}^2$ | $\rho, \text{ кг}/\text{м}^3$ | $n$ | $\sigma, \text{ Н}/\text{м}$ | $\sigma^*, \text{ Н}/\text{м}$ |
|--------------|-----------------------------|-------------------------------|-----|------------------------------|--------------------------------|
| Масло М-10   |                             |                               |     |                              |                                |

## 1.8 Контроль (вопросы, тесты, задачи и пр.)

### 1.8.1 Контрольные вопросы

1. Перечислите методы измерения плотности жидкости и поясните принцип действия известных плотномеров.
2. Дайте понятие сжимаемости. Опишите его характеристику.
3. Дайте определение коэффициента температурного расширения.
4. Опишите величины, использующие при определении коэффициентов вязкости вискозиметрами различных типов.
5. Опишите термин «вязкость жидкости». Покажите связь динамический и кинематический коэффициентов вязкости.
6. Дайте определение поверхностному натяжению жидкости. Покажите единицы измерения. Опишите прибор и его устройство.

### 1.8.2 Тестовые задания

|                |                                                                                     |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1.1</b>     | Рассматривается международная система единиц измерения.                             |
|                | Укажите размерности 1) Температуры 2) Давления 3) Энергии 4) Мощности 5) Плотности. |
| <b>Ответы:</b> |                                                                                     |
| 1              | Па                                                                                  |
| 2              | Вт                                                                                  |
| 3              | Дж                                                                                  |
| 4              | $\text{кг}/\text{м}^3$                                                              |
| 5              | К                                                                                   |

|                |                                                                                                                                                                                                                |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1.2</b>     | Рассматривается международная система единиц измерения.                                                                                                                                                        |
|                | Укажите размерности 1) Коэффициента динамической вязкости<br>2) Коэффициента кинематической вязкости<br>3) Коэффициента поверхностного натяжения<br>4) Коэффициента температурного расширения<br>5) Плотности. |
| <b>Ответы:</b> |                                                                                                                                                                                                                |
| 1              | $\text{м}^2/\text{с}$                                                                                                                                                                                          |
| 2              | $^\circ\text{C}^{-1}$                                                                                                                                                                                          |
| 3              | $\text{кг}/\text{м}^3$                                                                                                                                                                                         |
| 4              | Н/м                                                                                                                                                                                                            |
| 5              | Па·с                                                                                                                                                                                                           |

|                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p> ONTÜSTİK QAZAQSTAN<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/> «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ </p> |  <p> SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/> АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» </p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                             |                                                                                                                                                                                                      |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                                           |                                                                                                                                                                                                      |

|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1.3</b>     | <p>Укажите формулу для определения</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Коэффициента динамической вязкости</li> <li>2) Коэффициента кинематической вязкости</li> <li>3) Коэффициента поверхностного натяжения</li> <li>4) Коэффициента температурного расширения</li> <li>5) Плотности.</li> </ol> |
| <b>Ответы:</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 1              | $\nu = \mu/\rho$                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 2              | $\beta_T = \Delta V/(V \cdot \Delta t)$                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 3              | $\mu = F_{тр}/[S(dw/dn)]$                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 4              | $\sigma = K\rho^n$                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 5              | $\rho = m/V$                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

### 1.5 Контроль (вопросы, тесты, задачи и пр.)

#### 1.5.1 Контрольные вопросы

- 7.Перечислите методы измерения плотности жидкости и поясните принцип действия известных плотномеров.
- 8.Что называют сжимаемостью? Чем она характеризуется?
- 9.Как определяется коэффициент температурного расширения?
10. Какие величины измеряют при определении коэффициентов вязкости вискозиметрами различных типов?
11. Что подразумевают под термином «вязкость жидкости»? Как связаны динамический и кинематический коэффициенты вязкости?
12. Что такое поверхностное натяжение жидкости? В каких единицах она измеряется? Каким прибором? Как он устроен?

#### 1.5.2 Тестовые задания

|                |                                                                                                                                                           |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1.1</b>     | <p>Рассматривается международная система единиц измерения.</p> <p>Укажите размерности 1) Температуры 2) Давления 3) Энергии 4) Мощности 5) Плотности.</p> |
| <b>Ответы:</b> |                                                                                                                                                           |
| A              | Па                                                                                                                                                        |
| B              | Вт                                                                                                                                                        |
| C              | Дж                                                                                                                                                        |
| D              | кг/м <sup>3</sup>                                                                                                                                         |
| E              | К                                                                                                                                                         |

|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1.2</b>     | <p>Рассматривается международная система единиц измерения.</p> <p>Укажите размерности 1) Коэффициента динамической вязкости</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2) Коэффициента кинематической вязкости</li> <li>3) Коэффициента поверхностного натяжения</li> <li>4) Коэффициента температурного расширения</li> <li>5) Плотности.</li> </ol> |
| <b>Ответы:</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| A              | м <sup>2</sup> /с                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| B              | °C <sup>-1</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| C              | кг/м <sup>3</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| D              | Н/м                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| E              | Па·с                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |



|                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <p style="text-align: center;">             ОҢТҮСТІК ҚАЗАҚСТАН<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/>             «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ           </p>                                                                             |  |
| <p style="text-align: center;">              SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/>             АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»           </p> |  |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                                                                                                                                                                       |  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                                                                                                                                                                                     |  |

|     |                                                                                                                                                                                                                               |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.3 | Укажите формулу для определение<br>1) Коэффициента динамической вязкости<br>2) Коэффициента кинематической вязкости<br>3) Коэффициента поверхностного натяжения<br>4) Коэффициента температурного расширения<br>5) Плотности. |
| A   | $\nu = \mu/\rho$                                                                                                                                                                                                              |
| B   | $\beta_T = \Delta V/(V \cdot \Delta t)$                                                                                                                                                                                       |
| C   | $\mu = F_{\text{тр}}/[S(dw/dn)]$                                                                                                                                                                                              |
| D   | $\sigma = K\rho\eta$                                                                                                                                                                                                          |
| E   | $\rho = m/V$                                                                                                                                                                                                                  |
| 1.4 | Концентрация (температура) изменяется плавно от начальной до конечной в аппарате....                                                                                                                                          |
| A   | идеального вытеснения                                                                                                                                                                                                         |
| B   | идеального смешения                                                                                                                                                                                                           |
| C   | промежуточного типа                                                                                                                                                                                                           |
| D   | псевдооживленного слоя                                                                                                                                                                                                        |
| E   | с мешалкой                                                                                                                                                                                                                    |
| 1.5 | Давление и температура при нормальных физических условиях равно ...                                                                                                                                                           |
| A   | $P_0 = 760$ мм рт. ст., $T_0 = 273,15$ К                                                                                                                                                                                      |
| B   | $P_0 = 101325$ Па, $T_0 = 293,15$ К                                                                                                                                                                                           |
| C   | $P_0 = 1$ бар, $T_0 = 273,15$ К                                                                                                                                                                                               |
| D   | $P_0 = 750$ мм рт. ст., $T_0 = 293,15$ К                                                                                                                                                                                      |
| E   | $P_0 = 760$ мм рт. ст., $T_0 = 283,15$ К                                                                                                                                                                                      |

## Тема 2: Изучение уравнения Бернулли

**Цель:** Опытное подтверждение уравнения Д. Бернулли, т. е. понижения механической энергии по течению в канале переменного сечения и перехода потенциальной энергии в кинетическую и обратно (связи давления со скоростью).

### Задачи обучения:

#### Студент должен знать:

- виды энергии: потенциальная, кинетическая;
- размерности энергии;
- неравномерность распределения скоростей по живому сечению потока;
- потери напора на преодоление гидравлических сил трения между сечениями.

#### Студент должен уметь:

- измерять напор жидкости;
- построить напорную линию;
- построить пьезометрическую линию;
- определять потери напора на преодоление гидравлических сил трения между сечениями.

#### Основные вопросы темы:

1. Уравнение Бернулли для потока идеальной (невязкой) жидкости.
2. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости.

#### Методы обучения и преподавания:

Студенты должны разобраться в основных физических свойствах жидкости. На лабораторной установке:

1. Получить течение в канале переменного сечения.
2. Снять показания пьезометров.
3. Измерить время  $t$  перемещения уровня в баке.
4. Определить расход  $Q$  воды.

|                                                                                              |                                                                                   |                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                 |                                                                                   |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                               |                                                                                   |                                                                                                  |

5. Определить скоростные и полные напоры в сечениях канала.

6. Вычертить в масштабе канал с осями пьезометров и с указанием пьезометрических напоров.

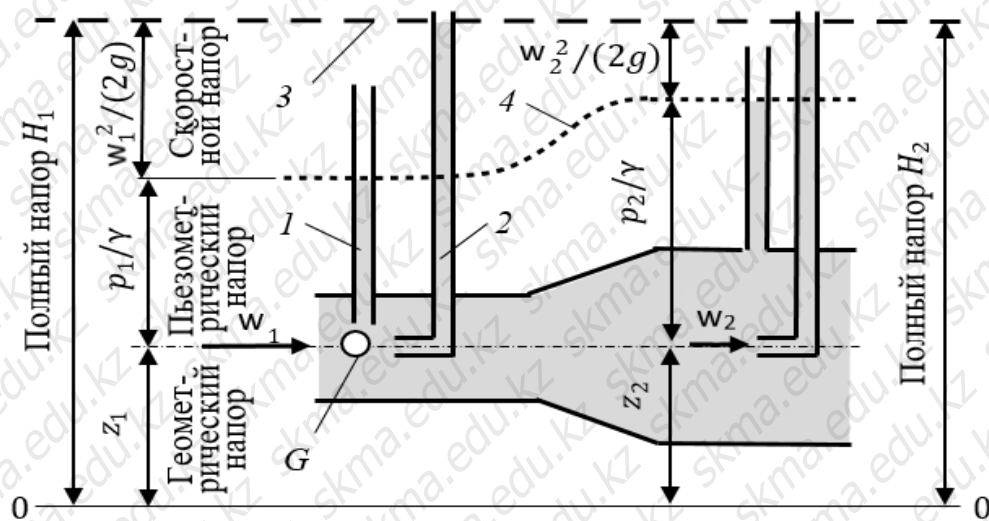
### 3.2 Теоретические сведения

**Механическая энергия жидкости.** Жидкость всегда обладает энергией, т. е. способностью совершить определенную работу. На рисунке 3.1 показана движущаяся жидкость весом  $G$ . Его полная механическая энергия  $E$  складывается из энергии положения  $E_{\text{пол}}$ , энергии давления  $E_{\text{давл}}$  и кинетической энергии  $E_{\text{кин}}$ .

Энергия положения равна работе по подъему жидкости весом  $G$  на геометрическую высоту  $z$  с заданной горизонтальной плоскости сравнения 0–0:  $E_{\text{пол}} = Gz$ .

Энергия давления представляет работу давления  $p$ , под действием которого объем жидкости весом  $G$  может подняться на пьезометрическую высоту  $h_p = p/\gamma$ , в пустом пьезометре 1 после открытия его нижнего конца:  $E_{\text{давл}} = G \cdot p/\gamma$ .

Кинетическая энергия равна работе по подъему жидкости весом  $G$  с уровня в пьезометре 1 на уровень в скоростной трубке 2, т. е. на высоту  $h_k = w^2/(2g)$ :  $E_{\text{кин}} = Gw^2/(2g)$ . Скоростная трубка (трубка Пито) изогнута и направлена отверстием против потока для восприятия дополнительного давления от частиц набегающего потока со скоростью  $w$  (рис. 3.1).



1 – пьезометр; 2 – трубка Пито; 3 – линия (напорная) полной энергии; 4 – линия (пьезометрическая) потенциальной энергии

Рис. 3.1. Графическая интерпретация уравнения Бернулли для потока идеальной жидкости.

Тогда полная механическая энергия рассматриваемого объема жидкости в потоке выразится в виде:

$$E = Gz + Gp/\gamma + Gw^2/(2g). \quad (3.1)$$

**Понятие «напор».** В гидравлике механическая энергия  $E$  принадлежит к единице веса  $G$  жидкости. Энергия единицы веса жидкости  $H = E/G$  называется удельной энергией или напором и измеряется в метрах:  $\text{Дж/н} = \text{н} \cdot \text{м/н} = \text{м}$ .

Поделив все члены уравнения (3.1) на  $G$ , получим выражение для полного напора (для полной удельной механической энергии) жидкости в виде суммы отдельных напоров:

$$H = z + p/\gamma + w^2/(2g), \quad (3.2)$$

где  $z$  – геометрический напор (удельная энергия положения);  $p/\gamma$  – пьезометрический напор (удельная энергия давления);  $w^2/(2g)$  – скоростной напор (удельная кинетическая энергия).

Уравнение Бернулли для потока идеальной (невязкой) жидкости выражает закон сохранения механической энергии и для двух сечений потока 1–1 и 2–2 записывается так:

$$z_1 + p_1/\gamma + w_1^2/(2g) = z_2 + p_2/\gamma + w_2^2/(2g), \quad (3.3)$$



|                                                                                                        |                                                                                  |                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>QONTÜSTİK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                           |                                                                                  |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                         |                                                                                  |                                                                                                  |

где индексы «1» и «2» означают номер сечения.

Из уравнения (3.3) следует, что для потока идеальной (невязкой) жидкости полная удельная энергия (полный напор) неизменна вдоль потока, и поэтому изменение одного вида энергии по длине потока приводит к обратному знаку. Таков энергетический смысл уравнения Бернулли. Например, при расширении горизонтального потока скорость  $w$  и, следовательно, кинетическая энергия  $w^2/(2g)$  уменьшаются, что в силу сохранения баланса вызывает увеличение потенциальной энергии  $p/\gamma$ . Другими словами, понижение скорости потока  $w$  по течению приводит к возрастанию давления  $p$  (рис. 3.1), и наоборот.

Из этого же рисунка очевиден и геометрический смысл уравнения Бернулли. Он заключается в том, что его слагаемые измеряются в единицах длины и представляют собой геометрическую, пьезометрическую и скоростную высоты, сумма которых постоянна вдоль потока идеальной жидкости.

**Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости.** При течении реальной (вязкой) жидкости между ее слоями возникает трение, что приводит к существенной неравномерности распределения скоростей по сечению потока, а также к потерям напора (энергии) при перемещении жидкости от одного сечения к другому (рис. 3.2). Поэтому уравнение Бернулли для потока реальной жидкости принимает такой вид:

$$z_1 + p_1/\gamma + \alpha_1 \cdot w_1^2/(2g) = z_2 + p_2/\gamma + \alpha_2 \cdot w_2^2/(2g) + h_{тр}, \quad (3.3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей по живому сечению потока, в расчетах часто не учитывается;  $h_{тр}$  – суммарные потери напора на преодоление гидравлических сил трения между сечениями 1–1 и 2–2 (гидравлические потери). Они определяются суммой потерь напора на трение по длине  $h_d$  и местных потерь  $h_m$ :

$$h_{тр} = h_d + h_m.$$

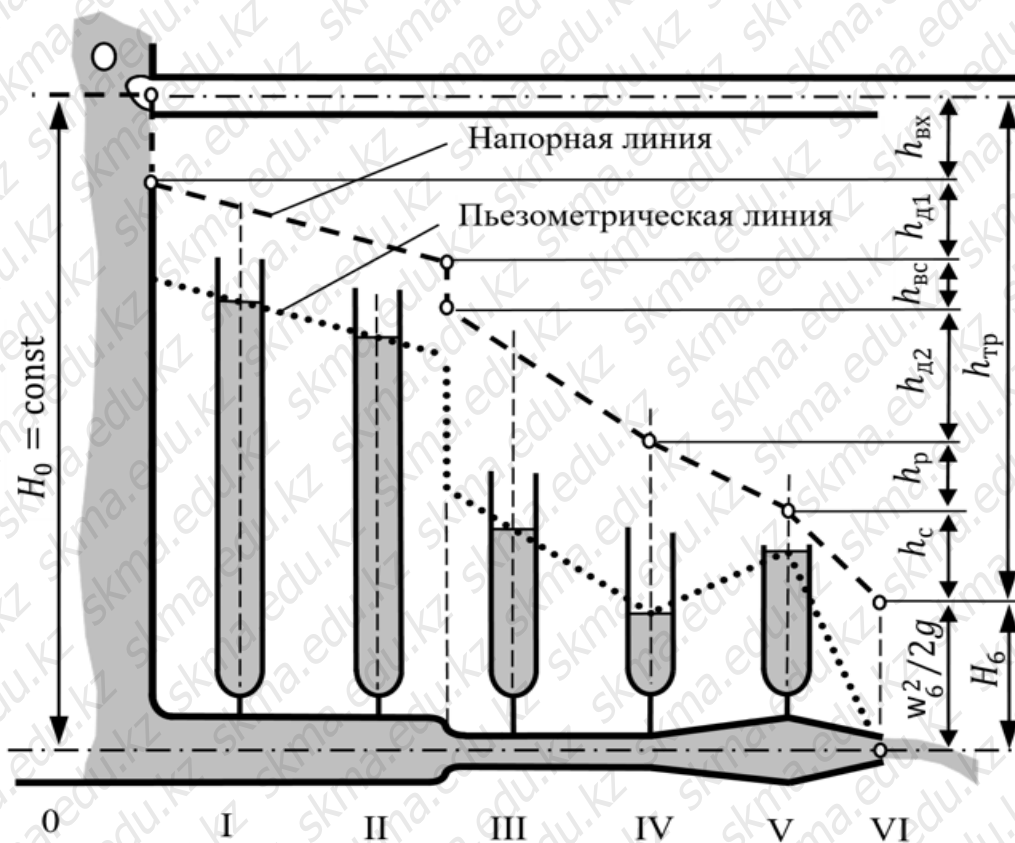
Потери на трение по длине  $h_d$  (линейные потери) возникают из-за трения слоев жидкости между собой в прямых участках труб постоянного сечения, т. е. при равномерном течении. Они возрастают пропорционально длине трубы.

Местные потери напора  $h_m$  вызваны деформацией потока и вихреобразованием в отдельных местах гидравлических систем (при изменении сечения и повороте труб, в вентиле, клапанах). Такие участки называют местными гидравлическими сопротивлениями.

Линия, объединяющая уровни жидкости в пьезометрах, называется пьезометрической. Она иллюстрирует изменение потенциальной энергии (потенциального напора  $z + p/\gamma$ ) по длине потока. Линия, построенная через уровни жидкости в трубках Пито, показывает распределение полной удельной механической энергии (полного напора) вдоль потока и именуется напорной. Падение полного напора, приходящееся на единицу длины потока  $l$ , называется гидравлическим уклоном  $I = h_{тр}/l$ .

Напорная и пьезометрическая линии дают наглядное представление о переходе одного вида энергии в другой по длине потока и способствуют установить значения основных параметров течения жидкости. Линии строятся, в соответствии с нижеуказанными условиями, выходящими из уравнения Бернулли.





$H_0, H_6$  – полные напоры на входе и выходе из канала;  $h_{вх}$  – потери напора на вход в канал;  $h_{д1}, h_{д2}$  – по длине на линейных участках 1 и 2;  $h_{вс}$  – на внезапное сужение;  $h_p, h_c$  – на плавные расширения и сужение;  $h_{тр}$  – суммарные потери напора на преодоление сил гидравлического трения во всем канале;  $w_6^2/2g$  – скоростной напор в сечении VI

Рисунок 3.2. Иллюстрация уравнения Бернулли для потока реальной жидкости.

1. Напорная линия (полный напор  $H = z + p/\gamma + \alpha w^2/(2g)$ ) постоянно снижается по течению (если на рассматриваемом участке отсутствует насос) из-за необратимости преобразования энергии механической в тепловую при протекании потоком сил гидравлического трения. При этом уклон линии (потери напора  $h_{тр}$ ) тем больше, чем меньше сечение участка потока (рис. 3.2).

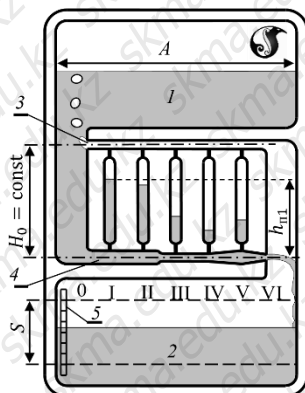
2. Пьезометрическая линия отражает изменение потенциальной энергии ( $z + p/\gamma$ ), и, в отличие от напорной, может не только снижаться, но и увеличиваться по течению. Это наблюдается при расширении потока (рис. 3.1, 3.2) за счет повышения давления  $p$  ввиду уменьшения скорости  $w$ . Пьезометрическая линия проходит через центр тяжести выходного сечения канала (трубопровода) при истечении жидкости в атмосферу и ниже оси канала, если давление в нем меньше атмосферного.

Расстояние между пьезометрической и напорной линиями численно равно кинетической энергии  $\alpha w^2/(2g)$  и поэтому обратно пропорционально диаметру трубы. Для участков потоков постоянного сечения средние скорости одинаковы по пути, поэтому такие линии, как правило, параллельны между собой (рис. 3.2). Эти линии для потоков в конфузорах (конических сходящихся патрубках) расходятся, а в диффузорах (конических расходящихся патрубках) – сходятся. В баках и водоемах, где жидкость не движется ( $w = 0$ ), напорная и пьезометрическая линии энергий совпадают со свободной поверхностью, если она находится под атмосферным давлением.

### 3.3. Порядок выполнения работы

1. При заполненном водой баке 1 (рис. 3.3) перевернуть установку и получить течение в канале переменного сечения 4.

2. Снять показания пьезометров  $h_n = p/\gamma$  по нижним частям менисков воды в них.
3. Измерить время  $t$  перемещения уровня в баке на произвольно заданную величину  $S$ .
4. По размерам  $A$  и  $B$  поперечного сечения бака, перемещению уровня  $S$  и времени  $t$  определить расход  $Q$  воды в канале, а затем скоростные  $h_k$  и полные  $H$  напоры в сечениях канала по порядку, указанному в табл. 3.1. Скорость в нулевом сечении (перед входом в канал) принять равной нулю. Так как канал горизонтальный и плоскость сравнения 0–0 проведена через его ось, то геометрический напор  $z_1 = z_2 = 0$ .



1, 2 – баки; 3 – канал постоянного сечения; 4 – канал переменного сечения; 5 – уровнемерная шкала; I–V – пьезометры

Рисунок 3.3. Схема лабораторной установки.

5. Вычертить в масштабе канал с осями пьезометров (рис. 3.2). Отложить от оси канала пьезометрические напоры  $h_n$  на осях пьезометров, наметить уровни жидкости и соединить их между собой и центром выходного сечения VI. Получится *пьезометрическая линия*, показывающая изменение потенциальной энергии (давления) вдоль потока. Для получения *напорной линии* (линии полной механической энергии) отложить от оси канала полные напоры  $H$  и соединить полученные точки.
6. Проанализировать изменения полной механической  $H$ , потенциальной  $p/\gamma$ , кинетической  $V^2/(2g)$  энергий жидкости вдоль потока и их соответствие уравнению Бернулли.

Таблица 3.1

| №<br>п/п | Наименование величин                    | Обозначение,<br>формула       | Сечения канала |   |    |     |    |   |    |
|----------|-----------------------------------------|-------------------------------|----------------|---|----|-----|----|---|----|
|          |                                         |                               | 0              | I | II | III | IV | V | VI |
| 1        | Площадь сечения канала, см <sup>2</sup> | $\omega$                      |                |   |    |     |    |   |    |
| 2        | Средняя скорость, см/с                  | $V = Q/\omega$                |                |   |    |     |    |   |    |
| 3        | Пьезометрический напор, см              | $h_n = p/\gamma$              |                |   |    |     |    |   |    |
| 4        | Скоростной напор, см                    | $h_k = V^2/(2g)$              |                |   |    |     |    |   |    |
| 5        | Полный напор, см                        | $H = P/(\gamma g) + w^2/(2g)$ |                |   |    |     |    |   |    |

Примечание.  $A = \dots$  см;  $B = \dots$  см;  $S = \dots$  см;  $t = \dots$  с;  $Q = ABS/t = \dots$  см<sup>3</sup>/с.

### 3.5 Контроль (вопросы, тесты, задачи и пр.)

#### 3.5.1 Контрольные вопросы

1. Поясните энергетический и геометрический смысл слагаемых уравнения Бернулли. Что такое гидравлический



|                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <p style="text-align: center;">             ОНТҮСТІК ҚАЗАҚСТАН<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/>             «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ         </p>                                                                              |  |
| <p style="text-align: center;">              SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/>             АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»         </p> |  |
| <p style="text-align: center;">Кафедра инженерных дисциплин</p>                                                                                                                                                                                                   |  |
| <p style="text-align: center;">Методические указания для лабораторных занятий</p>                                                                                                                                                                                 |  |

уклон?

2. Какими приборами измеряется напор жидкости?
3. Может ли напорная линия располагаться ниже пьезометрической, а пьезометрическая – ниже оси трубопровода? Почему?
4. Объясните, чем обусловлены потери напора по длине и местные гидравлические потери.

### 3.5.2 Тестовые задания

|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 33.1           | 1) Покажите основное уравнение гидростатики 2) Дифференциальное уравнение равенства Эйлера 3) Дифференциальное уравнение целостности (неразрывности) 4) Дифференциальное уравнение движения Эйлера 5) Дифференциальное уравнение движения Навье-Стокса.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Ответы:</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 11             | $\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 2              | $\left. \begin{aligned} \frac{dw_x}{d\tau} &= \frac{dw_x}{d\tau} + \frac{dw_x}{dx} w_x + \frac{dw_x}{dy} w_y + \frac{dw_x}{dz} w_z \\ \frac{dw_y}{d\tau} &= \frac{dw_y}{d\tau} + \frac{dw_y}{dx} w_x + \frac{dw_y}{dy} w_y + \frac{dw_y}{dz} w_z \\ \frac{dw_z}{d\tau} &= \frac{dw_z}{d\tau} + \frac{dw_z}{dx} w_x + \frac{dw_z}{dy} w_y + \frac{dw_z}{dz} w_z \end{aligned} \right\}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 3              | $\left. \begin{aligned} \rho \frac{dw_x}{d\tau} &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial x \partial z} \right) \\ \rho \frac{dw_y}{d\tau} &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y \partial z} \right) \\ \rho \frac{dw_z}{d\tau} &= -\frac{\partial P}{\partial z} - g \cdot \rho + \mu \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\}$ |
| 4              | $z + \frac{P}{\rho g} = const$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 5              | $\left. \begin{aligned} -\frac{\partial P}{\partial x} &= 0 \\ -\frac{\partial P}{\partial y} &= 0 \\ -\rho g - \frac{\partial P}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 33.2           | Укажите 1) Полный напор жидкости 2) Суммарные потери напора жидкости 3) Уравнение Бернулли для потока идеальной (невязкой) жидкости 4) Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости 5). Полную механическую энергию объема жидкости в потоке                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Ответы:</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 1              | $E = Gz + Gp/\gamma + Gw^2/(2g)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 2              | $z_1 + p_1/\gamma + w_1^2/(2g) = z_2 + p_2/\gamma + w_2^2/(2g)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 3              | $z_1 + p_1/\gamma + \alpha_1 \cdot w_1^2/(2g) = z_2 + p_2/\gamma + \alpha_2 \cdot w_2^2/(2g) + h_{тр}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 4              | $h_{тр} = h_d + h_m$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 5              | $H = z + p/\gamma + \alpha w^2/(2g)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |



|                                                                                              |                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                 |                                                                                                                                                                                   |
| Методические указания для лабораторных занятий                                               |                                                                                                                                                                                   |

### Тема 3: Изучение режима течения жидкости

**Цель:** Приобретение навыков по определению режимов течения жидкости визуальным и расчетным способами.

#### Задачи обучения:

##### Студент должен знать:

- ламинарный режим течения жидкости;
- турбулентный режим течения жидкости;
- расход жидкости;
- средняя по сечению потока скорость жидкости;

##### Студент должен уметь:

- измерять расход жидкости;
- измерять средняя по сечению потока скорость жидкости;
- определить коэффициенты вязкости;

#### Основные вопросы темы:

4. Режимы течения жидкости.

5. Критическое число Рейнольдса.

#### Методы обучения и преподавания:

Студенты должны разобраться в режимах течения жидкости. На лабораторной установке:

1. Определить ламинарный и турбулентный режимы течения жидкости
  2. Измерить расход жидкости.
  3. Сравнить полученные экспериментальные данные с их расчетными значениями.
- 2.2 Теоретические сведения

**Отличительные признаки режимов течения жидкости.** Различают два основных режима течения жидкости: ламинарный (слоистый) и турбулентный (вихревой). При ламинарном режиме частицы жидкости движутся по параллельным траекториям без перемешивания, поэтому поток имеет слоистую структуру, т. е. жидкость движется отдельными слоями. Турбулентное движение характеризуется пульсацией давления и скоростей частиц, что вызывает интенсивное перемешивание жидкости в потоке, т. е. вихревое движение.

**Визуальный способ определения режима течения.** Для визуализации течений применяют меченые частицы (например, частицы алюминия) или окрашенные (например, чернилами или тушью) струйки, которые показывают траектории движения множества частиц жидкости и линии тока.

Вторым способом визуализации пользовался английский ученый О. Рейнольдс при своих классических исследованиях режимов движения жидкости. В исследуемый поток воды вводилась струйка подкрашенной жидкости. При малых скоростях течения воды струйка имела форму нити и не смешивалась с окружающей жидкостью, что свидетельствовало о ламинарном режиме. С увеличением скорости течения в трубе происходил переход к турбулентному режиму, который фиксировался по размытию струйки и окрашиванию ею всего потока воды.

**Расчетный способ определения режимов течения.** Критерием режима течения является число Рейнольдса

$$Re = w \cdot d / \nu, \quad (2.1)$$

где  $w$  – средняя скорость потока;  $d$  – внутренний диаметр трубы (канала), если течение происходит в открытом канале или труба некруглого сечения, то диаметр выражают через гидравлический радиус  $R_r$  ( $d = 4R_r$ );  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости.

С технической точки зрения режим течения находят за счет сопоставления числа Рейнольдса  $Re$  с его критическим значением  $Re_k$ , который согласовывается сменой режимов движения жидкости. Для равномерных потоков жидкости в трубах (каналах) круглого сечения принимают  $Re_k = 2300$ , что соответствует условиям эксплуатации.

Режим считается ламинарным, если  $Re < Re_k$ , переходным  $Re = 2300 \div 10000$ , развитым турбулентным при  $Re \geq 10000$ .

Следует заметить, что в лабораторных условиях при очень плавном входе в трубу, медленном изменении скорости и отсутствии даже незначительных сотрясений труб переход от ламинарного режима к турбулентному может затягиваться до  $Re$

$= 4000$ , а при обратном переходе при значительной вибрации труб – до  $Re = 0,5 Re_k$ . Однако такие режимы в практике не встречаются.

Из выражения (2.1) видно, что числа Рейнольдса малы, и, поэтому, происходит режим ламинарный при низких скоростях течения  $w$  в каналах с малым диаметром  $d$  сечения (в порах грунта, капиллярах) или при движении жидкостей с большим коэффициентом вязкости  $\nu$  (масло, мазь).

Турбулентный режим в природе и технике встречается чаще. движение жидкости в трубах находится в зависимости от его закономерностей.

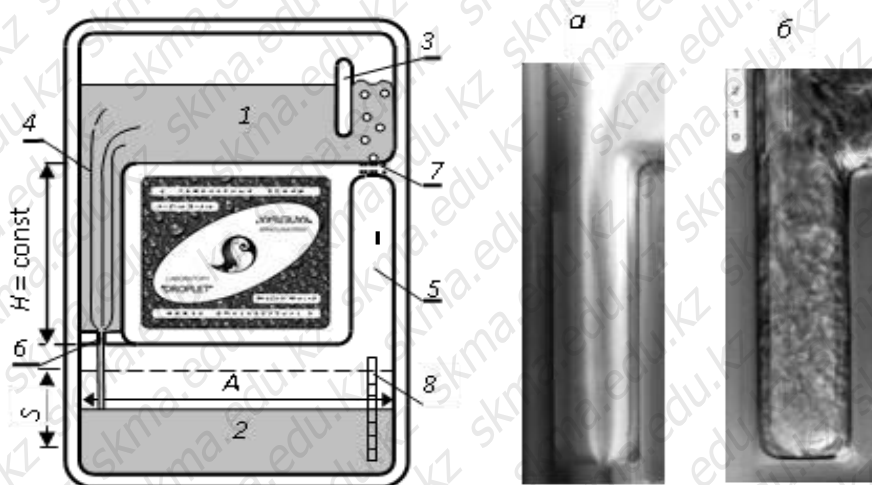
### 2.3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка выполнено в прозрачном виде (рис. 2.1, а), имеет баки 1 и 2 с успокоительной стенкой 3 для гашения возмущений в жидкости от падения струй и всплывания пузырей воздуха. Баки между собой соединены опытными каналами 4 и 5.

Конец канала 4 снабжен перегородкой со щелью 6, а противоположный конец канала 5 – решеткой (перфорированной перегородкой) 7. Устройство заполнено водой с микроскопическими частицами алюминия для визуализации течения. Уровень воды в баке 2 измеряется по шкале 8.

Лабораторная установка работает следующим образом. В положении установки, указанном на рис. 2.1, вода из верхнего бака 1 поступает самотеком через опытный канал 4 в нижний бак 2 и вытесняет из него воздух через решетку 7 в виде пузырей в жидкость в верхнем баке 1 на уровне его дна. Поэтому давление на входе в канал 4 (на дне верхнего бака) и над жидкостью в нижнем баке уравниваются и течение происходит под действием постоянного напора  $H = \text{const}$ , создаваемого столбом жидкости в канале. Так обеспечивается *установившееся* (с постоянным во времени расходом) движение жидкости в опытном канале 4 несмотря на понижение уровня в верхнем баке. Причем в нем устанавливается *ламинарный режим* (рис 2.1а) благодаря низким скоростям течения из-за большого сопротивления щели 6.

Если лабораторную установку перевернуть, то в канале 5 возникает установившееся *турбулентное течение* (рис. 2.1б) ввиду больших скоростей из-за малого гидравлического сопротивления решетки 7. Расход можно уменьшать наклоном устройства от себя.



1, 2 – баки; 3 – перегородка; 4, 5 – опытные каналы; 6 – щель; 7 – решетка; 8 – равномерная шкала

Рисунок 2.1. Общий вид лабораторной установки и структура потоков жидкости при ламинарном (а) и турбулентном (б) течении.



|                                                                                                                                                                                        |  |                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p style="text-align: center;">             ОҢТҮСТІК ҚАЗАҚСТАН<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/>             «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ           </p> |  |  <p style="text-align: center;">             SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/>             АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»           </p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                                                                                           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                                                                                                         |  |                                                                                                                                                                                                                                                                    |

## 2.4 Порядок выполнения работы

1.Получить в канале 4 течение жидкости (рис. 2.1, а). Для этого при заполненном водой баке 1 поставить лабораторную установку баком 2 на стол при произвольном наклоне ее от себя. Наблюдая за структурой потока жидкости в канале 4, определить режим течения визуальным способом.

2.При этом режиме измерить время  $\tau$  перемещения уровня воды в баке на заданное расстояние  $S$  (обычно 5 см) и снять показания термометра  $t$ , находящегося в лабораторной установке. Подсчитать число Рейнольдса по порядку, указанному в табл. 2.1.

3.Перевернуть лабораторную установку в его плоскости на  $180^\circ$  для получения потока в канале 5. На основе наблюдений определить режим течения в канале 5 и выполнить операции по п. 2.

4.Определить режимы течения путем сравнения рассчитанных значений чисел Рейнольдса с его критическим значением и проверить их соответствие наблюдаемым режимам.

5.Оценить инструментальную погрешность определения экспериментальных величин по формулам:

$$6. \Delta V = V(\Delta A/A + \Delta B/B + \Delta S/S); \quad \Delta w = w(\Delta V/V + \Delta \tau/\tau + 2\Delta d/d); \quad \Delta Re = Re(\Delta w/w + \Delta d/d + \Delta v/v),$$

где  $\Delta$  – абсолютная максимальная погрешность измеряемой величины, определяемая точностью прибора; обычно ее принимают равной половине наименьшего деления измерительного прибора. В расчетах принять, что величины  $A$ ,  $B$ ,  $S$  измерены миллиметровой линейкой;  $\Delta \tau = 0,5$  цены наименьшего деления шкалы секундомера;  $\Delta d = 0,01$  мм;  $\Delta v/v = 0,01$ .

Таблица 2.1

| № п/п | Наименование величин                                         | Обозначение, формула                | № опыта |   |
|-------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------|---|
|       |                                                              |                                     | 1       | 2 |
| 1     | Изменение уровня воды в баке, см                             | $S$                                 |         |   |
| 2     | Время наблюдения за уровнем, с                               | $\tau$                              |         |   |
| 3     | Температура воды, °C                                         | $t$                                 |         |   |
| 4     | Кинематический коэффициент вязкости, см <sup>2</sup> /с      | $\nu = 17,9/(1000 + 34t + 0,22t^2)$ |         |   |
| 5     | Объем воды, поступившей в бак за время $t$ , см <sup>3</sup> | $V = A \cdot B \cdot S$             |         |   |
| 6     | Расход воды, см <sup>3</sup> /с                              | $Q = V/\tau$                        |         |   |
| 7     | Средняя скорость течения в канале, см/с                      | $w = Q/\omega$                      |         |   |
| 8     | Число Рейнольдса                                             | $Re = w \cdot d/\nu$                |         |   |
| 9     | Название режима течения                                      |                                     |         |   |
| 10    | Абсолютная погрешность определения $Re$                      | $\Delta Re$                         |         |   |

Примечания:

1. Размеры поперечного сечения бака  $A$ ,  $B$ , гидравлический диаметр  $d$  и площадь поперечного сечения  $\omega$  опытных каналов указаны на корпусе установки.

2.  $A = \dots$  см;  $B = \dots$  см;  $d = \dots$  см;  $\omega = \dots$  см<sup>2</sup>.

## 2.5 Контроль (вопросы, тесты, задачи и пр.)

### 2.5.1 Контрольные вопросы

1. Определите режим движения жидкости



|                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <p style="text-align: center;">             ОҢТҮСТІК ҚАЗАҚСТАН<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/>             «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ           </p>                                                                              |  |
| <p style="text-align: center;">              SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/>             АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»           </p> |  |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                                                                                                                                                                        |  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                                                                                                                                                                                      |  |

2. Напишите формулы расчета критерия Рейнольдса для трубы круглого и произвольного поперечного сечения.
3. Укажите системы жидкости, которые движутся в ламинарном режиме. Приведите примеры турбулентного движения жидкости.
4. Поясните принцип действия лабораторной установки. Как в нем достигается установившееся течение?
5. Укажите факторы, от которых зависит переход от одного режима к другому и за счет чего он осуществляется в установке.
6. Дайте определение расхода жидкости и средняя по сечению потока скорость.
7. Оцените точность измерений.

### 2.5.2 Тестовые задания

|     |                                                                                                                                           |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.1 | Определите режим течения жидкости в трубе при<br>1) $Re < 2300$ 2) $Re = 2300$ 3) $Re \geq 10000$<br>4) $Re = 3\,500$ 5) $Re = 20\,000$ . |
|     | <b>Ответы:</b>                                                                                                                            |
| 1   | Развитый турбулентный                                                                                                                     |
| 2   | Ламинарный                                                                                                                                |
| 3   | Переходной                                                                                                                                |
| 4   | Переходной                                                                                                                                |
| 5   | Развитый турбулентный                                                                                                                     |

**Тема 4:** Определение сжимающей силы в гидравлическом прессе.

**Цель:** Ознакомление с устройством и работой гидравлического пресса.

**Задачи обучения:**

**Студент должен знать:**

- Давление.
- Закон Паскаля.
- Гидравлический пресс.

**Студент должен уметь:**

- Определять давление жидкости.
- Составлять баланс сил при равновесии.
- Перевести размерности давления из одной системы в другую.

**Основные вопросы темы:**

- Уравнение гидростатики.
- Баланс сил в гидравлическом прессе.
- Применение закона Паскаля.

**Методы обучения и преподавания:**

Студенты должны разобраться в законах гидростатики и конструкции гидравлического пресса.

На гидравлическом прессе:

1. Измерить геометрические размеры основных элементов пресса.
2. Определить давление по манометру.
3. Определить площади малого и большого поршней.
4. Определить усилие на малом поршне.
5. Определить усилие на большом поршне.
6. Определить усилие на рукоятке.
7. Сделать выводы по работе.

|                                                                                                                                                      |  |                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p style="text-align: center;"> ONTÜSTİK QAZAQSTAN<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/> «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ </p> |  | <p style="text-align: center;"> <br/> SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/> АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» </p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                                                         |  |                                                                                                                                                                                                                                        |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                                                                       |  |                                                                                                                                                                                                                                        |

Таблица 1. Результаты замера и расчета при проведении экспериментов на гидравлическом прессе

| №                      | Показатели                    | Ед. измерения       | Величина |
|------------------------|-------------------------------|---------------------|----------|
| 1. Результаты замеров  |                               |                     |          |
| 1.1                    | ас - плечо момента силы $q$ , | м                   |          |
| 1.2                    | ab - плечо момента силы $T$ , | м                   |          |
| 1.3                    | Диаметр малого поршня $d_1$   | м                   |          |
| 1.4                    | Диаметр большого поршня $d_2$ | м                   |          |
| 1.5                    | Давление по манометру $p$     | кгс/см <sup>2</sup> |          |
| 2. Результаты расчетов |                               |                     |          |
| 2.1                    | Давление по манометру $p$     | Па                  |          |
| 2.2                    | Площадь малого поршня $S_1$   | м <sup>2</sup>      |          |
| 2.3                    | Площадь большого поршня $S_2$ | м <sup>2</sup>      |          |
| 2.4                    | Усилие на большом поршне $Q$  | Н                   |          |
| 2.5                    | Усилие на малом поршне $T$    | Н                   |          |
| 2.6                    | Усилие на рукоятке $q$        | Н                   |          |

#### Теоретические сведения.

Гидравлический пресс является гидростатической машиной. Принцип действия пресса может быть описан основным уравнением гидростатики. На основе закона Паскаля сконструировано много различных гидравлических машин: силовых цилиндров, гидравлических мультипликаторов, аккумуляторов, домкратов.

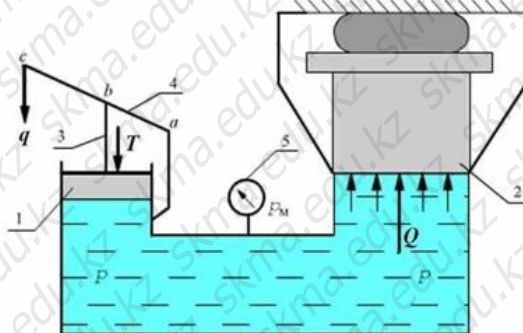


Рис.1. Схема устройства гидравлического пресса.

Пресс (рис. 1) состоит из двух сообщающихся между собой цилиндров с поршнями: малым 1 (площадью  $S_1$ ) и большим 2 (площадью  $S_2$ ). Малый поршень имеет шток 3, к которому через рычаг 4 передаётся усилие  $q$ . При этом на шток, а следовательно, и на весь малый поршень, будет действовать сила:

$$T = q \cdot \frac{ac}{ab}$$

где  $ac$  - плечо момента силы  $q$ , м;  $ab$  - плечо момента силы  $T$ , м. Сила  $T$  является поверхностной, действующей на каждую точку жидкости. Соприкасающейся с поверхностью малого поршня и создающей давление:

$$p = \frac{T}{S_1} = \frac{4T}{\pi d_1^2} \quad (1.2)$$



Закон Паскаля. Изменение давления на поверхности жидкости, ведет к изменению абсолютного давления в каждой точке объема жидкости на величину, равную изменению давления на поверхности, если при этом жидкость будет находиться в состоянии покоя. То есть, если изменение давления на поверхности жидкости равно  $\Delta p$ , то и в каждой точке жидкости получим увеличение давления на  $\Delta p$  независимо от её положения, что видно из уравнения:

$$p = p_0 + \Delta p + \rho q h \quad (1.3)$$

Следовательно, давление под большим поршнем равно давлению под малым поршнем  $p$ , а сила  $Q$ , возникающая при этом, определяется по выражению

$$Q = p S_2 = p \frac{\pi d_2^2}{4} \quad (1.4)$$

Сила  $Q$  будет во столько раз больше силы  $T$ , во сколько раз площадь поршня  $S_2$  будет больше площадью малого поршня  $S_1$ :

$$\frac{Q}{T} = \frac{S_2}{S_1}$$

или, учитывая момент силы,

$$Q = q \frac{S_2}{S_1} \frac{ac}{ab}$$

В действительности сила  $Q$  будет несколько меньше, чем рассчитанная по уравнению (1.5), вследствие трения поршня о стенки цилиндра. Это уменьшение учитывается введением коэффициента полезного действия  $\eta = 0,8$  и тогда

$$Q = \eta q \frac{S_2}{S_1} \frac{ac}{ab}$$

### Контроль (вопросы, тесты, задачи и пр.)

#### Контрольные вопросы

1. Что изучает гидростатика?
2. Что такое давление?
3. Как рассчитать давление в жидкости?
4. Сформулировать закон Паскаля и закон сообщающихся сосудов.
5. Что такое гидравлический пресс?

#### Тесты

Сумма членов основного уравнения гидростатики равна ... .

| атмосферному давлению.

| геометрическому напору.

| энергии положения.

| полному напору.

| **гидростатическому напору.**

2. Определите давление на свободной поверхности в открытом резервуаре.

| Осмотическое давление.

| Манометрическое давление.

| Вакуметрическое давление.

| **Атмосферное давление.**

Абсолютное давление.

3. Сформулируйте закон Паскаля.

Давления во все точки жидкости передается без изменения

Пьезометрическая высота

Местные потери напора

Потери напора по длине

Геометрическая высота

4. Уравнение движения вязкой несжимаемой жидкости определяется по уравнению:

уравнение неразрывности потока

дифференциальное уравнение движения Эйлера

дифференциальное уравнение движения Навье-Стокса

дифференциальное уравнение Бернулли

основное уравнение гидростатики

5. Гидравлический пресс дает увеличение ... на большом поршне:

силы давления

мощности

перемещения

скорости перемешивания

момента инерции

6. Укажите закон, на который основан принцип действия гидравлического пресса.

Закон Паскаля

Закон Архимеда

Закон Ньютона

Закон сохранения энергии

Закон количества движения

7. Какое усилие необходимо приложить к поршню гидравлического пресса диаметром чтобы создать давление  $P = 0,2 \text{ МПа}$

50 мм,

487,2 Н

125,6 Н

286,4 Н

573,6 Н

392,5 Н

8. Лучше всего прямому прессованию поддаются порошки с ...

размером частиц 0,5-1 миллиметров

размером частиц 0,1-0,5 миллиметров

размером частиц 5-10 миллиметров

размером частиц 15-20 миллиметров

размером частиц 10-50 миллиметров

9. Таблетки производят тремя методами...

титриметрическим, гравиметрическим, фотоколориметрическим

прямое прессование, с применением сухой грануляции, влажной грануляции

гранулирование, таблетирование, стандартизация

стандартизация, прессование, обезвоживание

формование, гранулирование, разрыхление

10. При прессовании от прочности частиц зависит...

прочность на истирание

время охлаждения частиц порошка

стойкость к раздавливанию

характер уплотнения частиц порошка и гранул

внешний вид



### Тема 5: Определение гидравлических сопротивлений трубопроводов.

**Цель:** Опытное определение коэффициентов гидравлического сопротивления и их сравнение с табличными или расчётными данными.

#### Задачи обучения:

##### Студент должен знать:

- виды гидравлических сопротивлений;
- методы расчета потерь напора;
- методы измерения потерь напора.

##### Студент должен уметь:

- Измерять расход жидкости.
- Определять физические свойства жидкости.
- Определять потери напора по длине трубопровода.
- Определять потери напора на местные сопротивления.

##### Основные вопросы темы:

- Зависимость коэффициента трения от режима течения жидкости.
- Потери напора по длине трубопровода.
- Потери напора при внезапном сужении

##### Методы обучения и преподавания:

Студенты должны разобраться в физических основах течения вязкой жидкости в трубопроводах. На виртуальной лабораторной установке:

1. Определить среднюю скорость потока в трубопроводе при заданных расходах.
2. Вычислить значение критерия Рейнольдса.
3. Определить опытное значение  $\lambda_{оп}$  для прямого участка трубопровода и сравнить его с  $\lambda_{теор}$ , рассчитанным по одной из формул (5) или (7) в зависимости от значения числа Re;
4. Определить опытное значение коэффициента местного сопротивления при внезапном расширении и сравнить его с табличным значением.
5. Опытные, расчетные и табличные данные занести в следующие таблицы:

**Таблица 1. Прямой участок трубопровода**

|                                                               |                   |      |  |  |
|---------------------------------------------------------------|-------------------|------|--|--|
| Длина прямого участка трубопровода, $L$                       | м                 | 8    |  |  |
| Потери на трение прямого участка, $\Delta p_{тр} = P_1 - P_2$ | мм вод.ст         |      |  |  |
|                                                               | Па                |      |  |  |
| Время, за которое набирается 50 л воды, $\tau$                | с                 |      |  |  |
| Расход, $Q$                                                   | м <sup>3</sup> /с |      |  |  |
| Диаметр трубопровода, $d$                                     | м                 | 0,04 |  |  |
| Площадь сечения трубопровода, $S$                             | м <sup>2</sup>    |      |  |  |
| Температура воды, $t$                                         |                   | 20   |  |  |
| Число Рейнольдса, $Re$                                        |                   |      |  |  |
| Коэффициент трения, $\lambda_{оп}$                            |                   |      |  |  |
| Коэффициент трения, $\lambda_{теор}$                          |                   |      |  |  |

**Таблица 2. Внезапное сужение**

|                                               |                |       |  |  |
|-----------------------------------------------|----------------|-------|--|--|
| Диаметр широкой части, $d_1$                  | м              | 0,05  |  |  |
| Диаметр узкой части, $d_2$                    | м              | 0,025 |  |  |
| Площадь сечения широкой части, $S_1$          | м <sup>2</sup> |       |  |  |
| Площадь сечения узкой части, $S_2$            | м <sup>2</sup> |       |  |  |
| Скоростной напор до сужения, $\rho w_1^2 / 2$ | Па             |       |  |  |

|                                                                                                                                                  |           |            |  |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|--|--|
| Скоростной напор после сужения, $\rho w_2^2 / 2$                                                                                                 | Па        |            |  |  |
| Показание дифманометра, $\Delta p_{ман. в. с} = \text{П9} - \text{П10}$                                                                          | мм вод.ст |            |  |  |
|                                                                                                                                                  | Па        |            |  |  |
| Расстояние между точками присоединения дифманометра, $l_{в.с.}$                                                                                  | м         | 0.1 + 0.15 |  |  |
| Потери на сужении $\rho w^2$ внезапном<br>$\Delta p_{м.с.} = \Delta p_{ман} + \left  \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right  \rho w^2 - \Delta p_{тр}$ | мм вод.ст |            |  |  |
|                                                                                                                                                  | Па        |            |  |  |
| Коэффициент сопротивления при сужении, $\zeta_{в.с.оп.}$                                                                                         |           |            |  |  |
| Коэффициент сопротивления при сужении, $\zeta_{в.с.}$<br>(табличный)                                                                             |           |            |  |  |

Таблица 3 — Значение коэффициента  $\zeta_{в.с.}$  при внезапном сужении трубопровода

|                |          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $d_2 / d_1$    | 0,1<br>0 | 0,20 | 0,30 | 0,40 | 0,50 | 0,60 | 0,70 | 0,80 | 0,90 | 1,00 |
| $\zeta_{в.с.}$ | 0,5      | 0,49 | 0,46 | 0,43 | 0,40 | 0,35 | 0,29 | 0,22 | 0,14 | 0    |

### Теоретические сведения.

Гидродинамический напор идеальной жидкости описывается уравнением Бернулли:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{w^2}{2g} = H = \text{const}, \quad (1)$$

где  $w^2/2g$  — скоростной или динамический напор, м;  $p/\rho g$  — статический или пьезометрический напор, м;  $z$  — геометрический напор или нивелирная высота, м.

Движение реальных текучих сред отличается от движения идеальных жидкостей наличием сопротивления движению, обусловленным силами внутреннего трения между элементарными слоями и струйками среды. По условию неразрывности потока его расход, а следовательно, и динамический напор остаются неизменными по длине трубопровода. Кроме того, для трубопровода постоянного сечения  $w = \text{const}$ . Поэтому гидравлическое сопротивление трубопровода уменьшает полный напор за счет уменьшения его статической составляющей  $p/\rho g$ .

Движение реальных жидкостей в горизонтальных каналах характеризуется уравнением Бернулли (при  $z_1 = z_2$ ):

$$p_1 + \frac{\rho w^2}{2} = p_2 + \frac{\rho w^2}{2} + \Delta p_{гид}, \quad (2)$$

где  $\Delta p_{гид} = \zeta \rho w^2 / 2$  — гидравлическое сопротивление участка трубопровода между двумя сечениями;  $\zeta$  — коэффициент сопротивления.



|                                                                                              |                                                                                  |                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                 |                                                                                  |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                               |                                                                                  |                                                                                                  |

Знание  $\zeta$  позволяет рассчитывать сопротивление технологических коммуникаций и аппаратов, что необходимо для определения параметров трубопроводов, выбора насоса, расхода энергии на транспортирование среды.

Общее гидравлическое сопротивление коммуникаций и аппаратов складывается из сопротивления трения и местных сопротивлений при изменении геометрической формы трубопроводов. Рассмотрим отдельно каждое из них.

#### А. Сопротивление трения

При ламинарном течении среды зависимость между потерями давления на трение и определяющими его факторами описывается законом Гагена-Пуазейля:

$$\Delta p_{mp} = p_1 - p_2 = \frac{32\mu lw}{d^2}, \quad (3)$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость, Па·с;  $w$  — средняя скорость потока, м/с;  $d$  — диаметр трубопровода, м;  $l$  — длина, м.

Из уравнения (3) после некоторых преобразований получается уравнение Дарси:

$$\Delta p_{тр} = \zeta \frac{\rho w^2}{2} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho w^2}{2},$$

где  $\zeta = \lambda l / d$  — коэффициент сопротивления трения,  $\lambda$  — коэффициент гидравлического трения. Сопоставляя уравнения (3) и (4), получим:

$$\lambda = 64 / Re$$

Коэффициент гидравлического трения или просто коэффициент трения при турбулентном режиме аналитически рассчитать нельзя. Исследования показали, что для гладких труб в области значений  $2300 < Re < 100\,000$  он может быть определен по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$$

#### Б. Местные сопротивления

Местные сопротивления связаны с изменением геометрической формы потока (скорости или направления) при поворотах, при прохождении через участки резкого или плавного расширения, при сужениях в кранах, задвижках, вентилях и т.д.

Потери полного напора на местные сопротивления проявляются за счет уменьшения его статической составляющей, выраженной в метрах столба текучей среды или в единицах давления. Они, как и потери на трение (см. уравнение 4), выражаются в долях динамического напора.

При резком расширении трубопровода скорость  $w_2$  в широком сечении оказывается меньше скорости  $w_1$  в узком сечении во столько раз, во сколько раз площадь широкого сечения больше площади узкого сечения. При этом происходит как бы наталкивание узкой струи на более медленную широкую, поэтому условно здесь можно говорить о столкновении ударного характера. Исходя из теоремы механики о кратковременном действии сил при ударе, французский ученый Борд показал, что величина потерь напора при внезапном расширении может быть описана выражением:

|                                                                                                              |                                                                                  |                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/><b>MEDISINA<br/>AKADEMIASY</b><br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/><b>MEDICAL<br/>ACADEMY</b><br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                 |                                                                                  |                                                                                                         |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                               |                                                                                  |                                                                                                         |

Потеря напора в месте внезапного расширения происходит за счет вихреобразования в периферийной части потока А (рисунок 1). На это расходуется часть энергии жидкости.

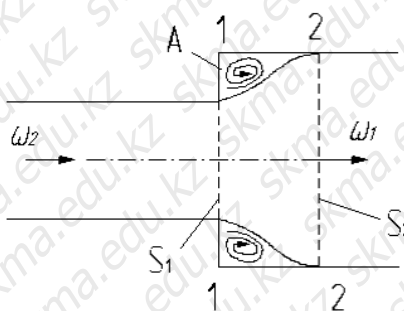


Рисунок 1- Внезапное расширение

При внезапном сужении трубопровода (рисунок 2) в кольцевом пространстве А (застойная зона) происходит образование вихревых движений. Кроме того, вследствие сужения струи и в малом сечении трубопровода (S<sub>2</sub>) образуются вихри в области А<sub>1</sub>.

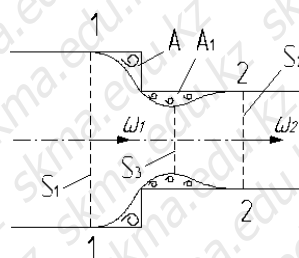


Рисунок 2- Внезапное сужение

«Самосужение» струи в сечении S<sub>3</sub> объясняется инерционными силами потока, которые в непосредственной близости от узкого сечения сходятся к оси трубопровода. Опыты показывают, что основные потери энергии происходят в области А<sub>1</sub>. определение потерь производится в этом случае по выражению:

$$\Delta p_{в.с.} = \zeta_{в.с.} \frac{\rho w_2^2}{2}, \quad (86)$$

где w<sub>2</sub> — скорость потока в узком сечении, м/с.

Коэффициенты местных сопротивлений для кранов, вентилях и др. также определяются опытным путем и зависят от конструкции запорного устройства.

## 5. Литература:

### Основная:

1. В.И. Чуешов, Е.В. Гладух, И.В. Сайко. Технология лекарств промышленного производства. Ч. 1. – Винница: Нова книга, 2014. -696 с.
2. В.И. Чуешов, Е.В. Гладух, И.В. Сайко. Технология лекарств промышленного производства. Ч. 2. –Винница: Нова книга, 2014. -664 с.
3. Промышленная технология лекарств, Том 1. Под ред. Чуешова В.И. – Х.: МТК-Книга, Издательства НФАУ, 2002 – 560 с.
4. Промышленная технология лекарств, Том 2. Под ред. Чуешова В.И. – Х.: МТК-Книга, Издательства НФАУ, 2002 – 557 с.
5. Мانتлер С. Н. Процессы и аппараты химической технологии : учебное пособие / С. Н. Мانتлер, Г. М. Жуманазарова. - Министерство образования и науки Республики Казахстан. - Алматы : "Бастау", 2018. - 256 с



|                                                                                                       |                                                                                  |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                  |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                  |                                                                                                  |

6. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: В двух томах / Ю.И. Дытнерский. — М.: Альянс, 2015. — 368 с.
7. Дытнерский, Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию: Учебное пособие для вузов / Ю.И. Дытнерский, Г.С. Борисов, В.Брыков. - М.: Альянс, 2015. - 496 с.
8. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов / А.Г. Касаткин. - М.: Альянс, 2014. - 752 с.
9. Остриков А.Н. Процессы и аппараты. Расчет и проектирование аппаратов для тепловых и тепломассообменных процессов: Учебное пособие / А.Н. Остриков, В.Н. Василенко и др. - СПб.: Лань, 2018. - 440 с.
10. Алексеев, Г.В. Виртуальный лабораторный практикум по курсу «Процессы и аппараты пищевых производств»: Уч. Пособие / Г.В. Алексеев, И.И.

#### **дополнительная:**

11. Плаксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. — М.: КолосС, 2008. — 760 с.
12. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. - М.: Колос, 2000.
13. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии - Л.: Химия, 1987
14. Государственная Фармакопея Республики Казахстан. — том 1 — Алматы. — Издательский дом: «Жибек жолы».— 2008.— 592 с.
15. Государственная Фармакопея Республики Казахстан.— том 2. — Алматы.— Издательский дом: «Жибек жолы».— 2009. — 1 70
16. Сағындыкова Б.А. Дәрілердің өндірістік технологиясы.— Алматы.—2011.— 346 б.
17. Акбердиев Ә.С. Тамақ өндірісінің процестері және аппараттары, Алматы; 1998 ж.

## **6. Контроль (вопросы, тесты, задачи и пр.)**

### **Контрольные вопросы**

1. Гидравлические сопротивления и факторы, обуславливающие их.
2. Коэффициент трения и его зависимость от режима течения и шероховатости трубопроводов.
3. Местные сопротивления.
4. Полная потеря напора в трубопроводах.
5. Как рассчитываются потери напора на трение в трубопроводах и аппаратах?
6. Как рассчитываются потери напора на местные сопротивления в трубопроводах и аппаратах?

|                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p style="text-align: center;"> ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/> «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ </p> | <div style="text-align: center;">  <p> SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/> АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» </p> </div> |
| <p style="text-align: center;">Кафедра инженерных дисциплин</p>                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                               |
| <p style="text-align: center;">Методические указания для лабораторных занятий</p>                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                               |

### Тесты

1. Укажите уравнение Бернулли для идеальной несжимаемой жидкости.

$$| z_1 + P_1/(\rho g) + w_1^2/(2g) = z_2 + P_2/(\rho g) + w_2^2/(2g) + h_n$$

$$| z_1 + P_1/(\rho g) + w_1^2/(2g) = z_2 + P_2/(\rho g) + w_2^2/(2g)$$

$$| P_1/(\rho g) + w_1^2/(2g) = P_2/(\rho g) + w_2^2/(2g)$$

$$| \partial w_x / \partial x + \partial w_y / \partial y + \partial w_z / \partial z = 0$$

$$| \partial \rho / \partial \tau + \partial (\rho w_x) / \partial x + \partial (\rho w_y) / \partial y + \partial (\rho w_z) / \partial z = 0$$

2. Укажите уравнение Бернулли для реальной несжимаемой жидкости.

$$| z_1 + P_1/(\rho g) + w_1^2/(2g) = z_2 + P_2/(\rho g) + w_2^2/(2g)$$

$$| P_1/(\rho g) + w_1^2/(2g) = P_2/(\rho g) + w_2^2/(2g)$$

$$| z_1 + P_1/(\rho g) + w_1^2/(2g) = z_2 + P_2/(\rho g) + w_2^2/(2g) + h_n$$

$$| \partial w_x / \partial x + \partial w_y / \partial y + \partial w_z / \partial z = 0$$

$$| \partial \rho / \partial \tau + \partial (\rho w_x) / \partial x + \partial (\rho w_y) / \partial y + \partial (\rho w_z) / \partial z = 0$$

3. В уравнении Бернулли величину  $w^2/(2g)$  называют:

**скоростным напором**

статистическим напором

геометрическим напором

гидродинамическим напором

гидростатическим напором

4. В уравнении Бернулли напор  $P/(\rho g)$  характеризует:

**удельную потенциальную энергию давления в данной точке**

удельную потенциальную энергию положения в данной точке

удельную кинетическую энергию в данной точке

удельную динамическую энергию

удельную статическую энергию

5. В уравнении Бернулли  $w^2/(2g)$  характеризует:

**удельную кинетическую энергию в данной точке**

удельную потенциальную энергию положения в данной точке

удельную потенциальную энергию давления

удельную динамическую энергию

удельную статическую энергию

6. Покажите дифференциальное уравнение движения.

$$| \frac{\partial t}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial t}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial t}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \nabla^2 t$$

$$| \rho \frac{d\omega}{dt} = \rho g - \nabla P + \mu \nabla^2 \omega$$

$$| \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} = 0$$



$$\left| -\lambda \left( \frac{dt}{dn} \right)_{\text{нов}} \right| = \alpha \cdot \Delta t$$

$$dQ = dU + dL$$

7. Покажите дифференциальное уравнение неразрывности.

$$\rho \frac{d\omega}{d\tau} = \rho g - \nabla P + \mu \nabla^2 \omega$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial t}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial t}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \nabla^2 t$$

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} = 0$$

$$\left| -\lambda \left( \frac{dt}{dn} \right)_{\text{нов}} \right| = \alpha \cdot \Delta t$$

$$dQ = dU + dL$$

8. Покажите формулу для определения коэффициента трения при ламинарном режиме движения.

$$\xi_{\text{гид}} = \lambda / d$$

$$h_{\text{гид}} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{W^2}{2g}$$

$$\Delta P_{\text{гид}} = (\lambda / d) \cdot (w^2 / 2)$$

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$$

9. Определите потери напора на трение:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$$

$$\xi_{\text{гид}} = \lambda / d$$

$$h_{\text{гид}} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{W^2}{2g}$$

$$\Delta P_{\text{гид}} = (\lambda / d) \cdot (w^2 / 2)$$

$$h_{\text{гид}} = w^2 / 2g$$

10. Определите потери давления на преодоления сопротивления трения.

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$$

$$\Delta P_{\text{гид}} = (\lambda / d) \cdot (w^2 / 2)$$

$$\xi_{\text{гид}} = \lambda / d$$

$$h_{\text{гид}} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{W^2}{2g}$$

$$h_{\text{гид}} = w^2 / 2g$$

|                                                                                                       |  |                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  |  <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |  |                                                                                                                                                                                    |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |  |                                                                                                                                                                                    |

## Тема 6: Принцип работы и конструкции центробежного насоса

**Цель:** Изучение устройства центробежного насоса;

2. Экспериментальное определение основных технических показателей центробежного насоса.

**Задач обучения:**

**Студент должен знать:**

- Классификацию центробежных насосов;
- Принцип работы центробежных насосов;
- Основные технические показатели центробежного насоса;

**Студент должен уметь:**

- Составлять уравнение Бернулли для расчета характеристик центробежного насоса;
- Определить производительность насоса;
- Определить напор насоса;
- Выбрать конструкцию центробежного насоса;

**Основные вопросы темы:**

1. Конструкции центробежных насосов.
2. Принцип работы центробежного насоса.
3. Уравнение Бернулли.
4. Производительность насоса.
5. Мощность насоса.
6. Напор насоса.
7. КПД насоса.

**Методы обучения и преподавания:**

Студенты должны разобраться с устройством и работой центробежного насоса. Разобрать центробежный насос на отдельные детали:

1. Изучить устройство и принцип действия центробежного насоса;
2. Нарисовать эскиз рабочего колеса центробежного насоса, указать его основные размеры;
3. Определить производительность центробежного насоса;
4. Определить напор центробежного насоса.
5. Определить потребляемую мощность насоса.
6. Полученные данные занести в таблицу.

Таблица 1.

| №  | Наименование параметра                   | Обозначение     | Значение     |
|----|------------------------------------------|-----------------|--------------|
| 1  | Тип насоса                               | PB – 38         | Центробежный |
| 2  | Диаметр входного сечения рабочего колеса | D0, мм          |              |
| 3  | Наружный диаметр рабочего колеса         | D2, мм          |              |
| 4  | Диаметр втулки рабочего колеса           | dвт, мм         |              |
| 5  | Производительность насоса                | Q, м³/с         |              |
| 6  | Производительность насоса                | Q, м³/ч         |              |
| 7  | Напор насоса                             | H, м            |              |
| 8  | Потребляемая мощность насоса             | N, Вт           |              |
| 8  | Коэффициент быстроходности насоса        | ns, об/мин      |              |
| 9  | Число сторон всасывания                  | i <sub>вх</sub> |              |
| 10 | Число ступеней нагнетания                | i <sub>ст</sub> |              |
| 11 | Частота вращения вала насоса             | n, об/мин       | 725          |

### Теоретические сведения

Насосами называются гидравлические машины и аппараты, создающие поток жидкой среды. Насосы создают разность давлений жидкости непосредственно в самих насосах и трубопроводах и, таким образом, преобразуют энергию двигателя в энергию перемещаемой жидкости.



|                                                                                                                                          |                                                                                   |                                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p style="text-align: center;">ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/><b>MEDISINA<br/>AKADEMIASY</b><br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p style="text-align: center;">SOUTH KAZAKHSTAN<br/><b>MEDICAL<br/>ACADEMY</b><br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                                             |                                                                                   |                                                                                                                                     |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                                                           |                                                                                   |                                                                                                                                     |

В динамических насосах жидкость перемещается при воздействии сил на незамкнутый объем жидкости, который непрерывно сообщается со входом в насос и выходом из него. В объемных насосах жидкость перемещается (вытесняется) при периодическом изменении замкнутого объема жидкости, который попеременно сообщается со входом в насос и выходом из него. В лопастных насосах энергия сообщается жидкости при обтекании лопастей рабочего колеса (колес) насоса. В насосах трения жидкость перемещается под воздействием сил трения. В объемных насосах с возвратно-поступательным движением рабочего органа жидкость получает энергию при возвратно-поступательном движении рабочего органа. В роторных насосах энергия сообщается жидкости при вращательном движении рабочего органа.

Основные параметры работы насосов:

**Производительность (подача)  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ )** определяется объемом жидкости, подаваемой насосом в нагнетательный трубопровод в единицу времени.

**Напор  $H$  (м) (давление  $p$  (Па))** характеризует энергию, которая сообщается насосом единице веса перекачиваемой жидкости. (Напор – это как бы высота, на которую может быть поднят 1кг перекачиваемой жидкости за счет энергии, сообщаемой ей насосом).

**Мощность (Вт).** Различают полезную мощность  $N_{\text{п}}$ , мощность на валу насоса  $N_{\text{в}}$ , мощность, потребляемую двигателем  $N_{\text{дв}}$ , и установочную мощность  $N_{\text{уст}}$ . Полезная мощность  $N_{\text{п}}$  затрачивается на сообщение жидкости энергии и равна произведению массового расхода ( $\rho g Q$ ) на приращение удельной энергии жидкости в насосе ( $H$ ), т.е.

$$N_{\text{п}} = \rho g Q H, \text{ Вт.}$$

Мощность на валу  $N_{\text{в}}$  больше  $N_{\text{п}}$  из-за потерь энергии в насосе, которые учитываются коэффициентом полезного действия (к.п.д.) насоса  $\eta$ , т.е.

$$N_{\text{в}} = N_{\text{п}} / \eta.$$

**К.п.д.  $\eta$**  характеризует совершенство конструкции и экономичность эксплуатации насоса. Различают объемный к.п.д., который учитывает наличие утечек жидкости через зазоры, сальники и т.п.; гидравлический к.п.д., который учитывает потери напора при движении жидкости через насос и механический к.п.д., характеризующий потери мощности на механическое трение в насосе (подшипники, сальники и др.). Значение  $\eta$  зависит от конструкции и степени износа насоса (для центробежных насосов  $\eta=0,6... 0,7$ , для поршневых  $\eta=0,8...0,9$ ).

Мощность, потребляемая двигателем  $N_{\text{дв}}$  больше мощности на валу насоса вследствие механических потерь в передаче от двигателя к насосу и в самом двигателе. Это учитывается к.п.д. передачи, к.п.д. двигателя. Установочная мощность двигателя  $N_{\text{уст}}$  рассчитывается по величине  $N_{\text{дв}}$  с учетом возможных перегрузок в момент пуска насоса:  $N_{\text{уст}} = \beta N_{\text{дв}}$ , где  $\beta=1,1...2,0$  – коэффициент запаса мощности, принимаемый в зависимости от мощности двигателя.

Основные элементы насосной установки (рис. 1): приемная емкость 1, напорная емкость 2, насос 3. Перекачивается жидкость из приемной емкости в напорную. Обозначим:  $p_0$  – давление в приемной емкости;  $p_2$  – давление в напорной емкости. Трубопровод на участке от приемной емкости до насоса называется всасывающим трубопроводом (патрубком). От насоса до напорной емкости трубопровод называется напорным или нагнетательным. Давление во всасывающем патрубке гораздо меньше, чем в нагнетательном (как правило, во всасывающем патрубке давление ниже атмосферного, т.е. – вакуум. Высота всасывания  $H_{\text{вс}}$  – расстояние от уровня жидкости в приемной емкости до оси насоса. Высота нагнетания  $H_{\text{н}}$  – расстояние от оси насоса до уровня жидкости в напорной емкости. Геометрическая высота подъема жидкости  $H_{\text{г}}$  – расстояние по вертикали между уровнями жидкости в приемной и напорной емкостях. Как правило насосная установка оснащается вакуумметром В (на всасывающем трубопроводе) и манометром М (на нагнетательном трубопроводе).



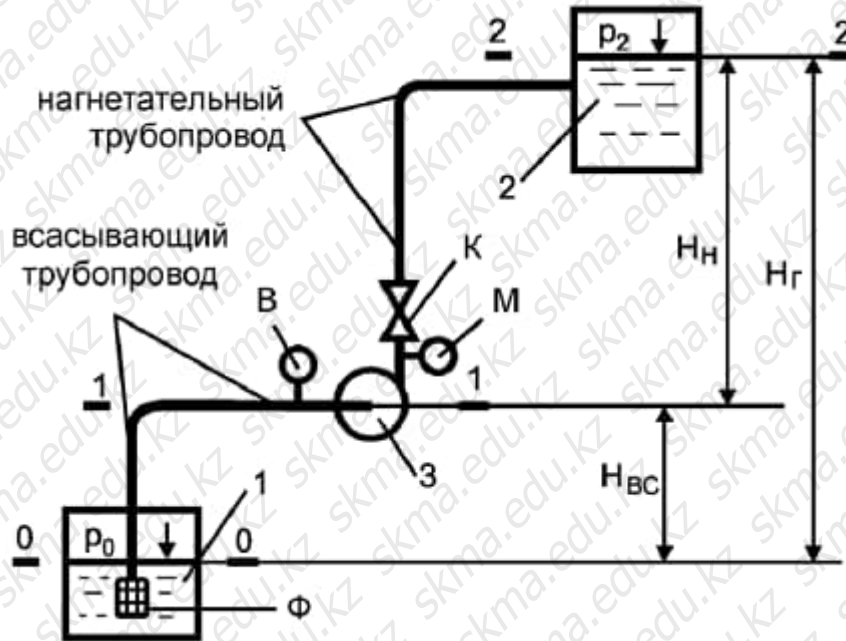


Рисунок 1. Схема насосной установки

На погружном конце всасывающего патрубка устанавливают фильтр клапан  $\Phi$ , а на нагнетательном трубопроводе в непосредственной близости от насоса устанавливают кран (вентиль)  $K$ .

Необходимый (или потребный) напор для обеспечения нужной подачи можно определить, составив уравнения Бернулли для характерных сечений 0-0, 1-1 и 2-2.

$$H = H_r + \frac{P_2 - P_0}{\rho g} + h_n + h_{bc}, \quad (1)$$

где  $h_n$  и  $h_{bc}$  – потери напора на нагнетательном и всасывающем участках. Таким образом, потребный напор насоса  $H$  затрачивается на перемещение жидкости на геометрическую высоту подъема  $H_r$ , преодоление разности давлений в напорной и приемной емкостях и преодоление гидравлических сопротивлений нагнетательного  $h_n$  и всасывающего трубопроводов  $h_{bc}$ . Уравнение (1) используют при подборе насосов для технологических установок. Если трубопровод горизонтальный и давление в приемной и напорной емкостях одинаково (как правило), то формула (1) упрощается:  $H = h_n + h_{bc}$ .

Величина высоты всасывания насоса  $H_{bc}$  (см. рис. 1) не может быть назначена произвольно. Из уравнения Бернулли для сечений 0-0 и 1-1 определяем

$$H_{bc} = \frac{P_0}{\rho g} - \left( \frac{P_{bc}}{\rho g} + \frac{v_{bc}^2 - v_0^2}{2g} + h_{bc} \right),$$

где  $v_{bc}$  и  $v_0$  – скорости движения жидкости во всасывающем трубопроводе и приемной емкости соответственно.

Таким образом,  $H_{bc}$  увеличивается с возрастанием давления  $p_0$  и уменьшается с увеличением давления во всасывающем патрубке  $p_{bc}$ , скорости и потерь напора. Практически высоту всасывания насоса  $H_{bc}$  выбирают в пределах 5...6 м при скорости движения жидкости во всасывающей трубе около 0,8...1,0 м/с. Для устойчивой работы насоса давление в его всасывающем патрубке должно быть больше давления насыщенного пара жидкости при температуре всасывания ( $p_{bc} > p_t$ ), т. к. в противном случае жидкость в насосе начнет кипеть. При этом в результате интенсивного выделения из жидкости паров возможен разрыв потока.

|                                                                                                       |                                                                                   |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                   |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                   |                                                                                                  |

Центробежные насосы характеризуются большими производительностями независимо от величины напора. Основной частью центробежного насоса (рис. 2) является рабочее колесо 1, имеющее изогнутые лопатки. Колесо соединено с валом 2 и заключено в кожух (спиральную камеру) 3. При быстром вращении рабочего колеса 1, приводимого во вращение от двигателя, развивается центробежная сила. Под ее влиянием жидкость между лопатками колеса прогоняется к его периферии и, выходя из колеса, поступает в спиральную камеру насоса, а из нее в нагнетательный трубопровод 4. Освобождающееся от выброшенной жидкости центральное пространство насосной камеры заполняется жидкостью, поступающей по всасывающей трубе 6 под действием внешнего давления  $p_0$ . Таким образом, образуется непрерывный поток жидкости в насос, а из него – к месту подачи.

До начала своей работы центробежные насосы требуют предварительной заливки, без чего они не могут производить всасывание жидкости. Для того, чтобы жидкость при заливке насоса не вытекала из него в исходный резервуар, на погруженном конце всасывающей трубы устанавливается приемный обратный клапан 5, снабженный фильтром (сеткой) для предохранения от загрязнений. Для увеличения подачи при данном напоре Дподачи небольших объемов жидкости на значительную высоту делают насосы с несколькими последовательно соединенными колесами. По величине создаваемого напора различают: низконапорные центробежные насосы (при напоре до 20 м); насосы среднего давления (напорот 20 до 60 м), а при напоре более 60 м – насосы высокого давления.

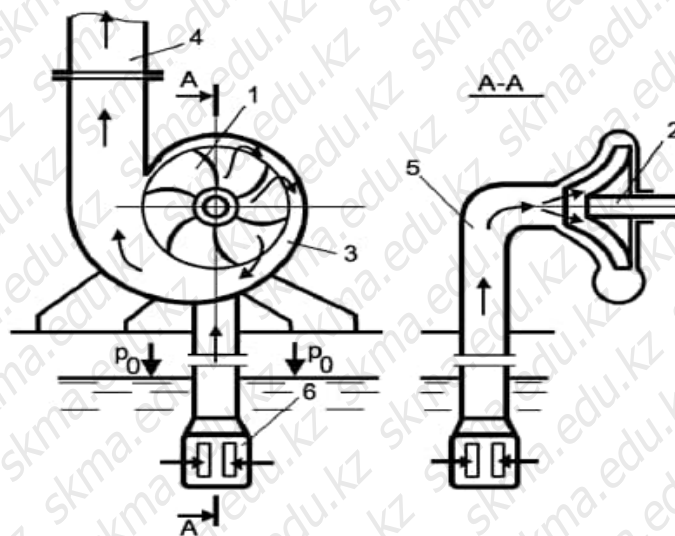


Рисунок 2. Центробежный насос

По способу подвода жидкости на рабочее колесо центробежные насосы подразделяют на насосы с односторонним и двусторонним входом. По расположению вала: горизонтальные и вертикальные насосы. По способу соединения с двигателем: со шкивом или с редуктором; при помощи муфты; моноблоки (насосы, имеющие общий вал с двигателем).

Подача  $Q$  (м<sup>3</sup>/с) и напор  $H$  (м) насоса при максимальном КПД определяется по формулам:

$$D_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{D_0^2 + d_{\text{ВТ}}^2},$$

$$Q = \left( \frac{D_{\text{ЭКВ}}}{K_D} \right)^3 n \cdot i_{\text{вн}},$$

$$H = i_{\text{вТ}} \sqrt[3]{\left( \frac{3,65 \cdot n \cdot \sqrt{\frac{Q}{i_{\text{вТ}}}}}{n_s} \right)^4}$$



|                                                                                                       |                                                                                  |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                  |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                  |                                                                                                  |

где  $D_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр входа в колесо, м;  $K_D = 4 \dots 4,5$  – коэффициент;  $n$  – частота вращения вала насоса, об/мин;  $i_{\text{в}}$  – число сторон всасывания ( $i_{\text{в}}=1$ );  $i_{\text{ст}}$  – число ступеней насоса ( $i_{\text{ст}}=1$ );  $n_s$  – коэффициент быстроходности насоса, об/мин.

Зависимость коэффициента быстроходности  $n_s$  от отношения диаметров рабочего колеса  $D_2 / D_0$  определяется по графику на рис. 3.

Потребляемая мощность насоса  $N$  (Вт):

$$N = \beta \frac{\rho g Q H}{\eta},$$

где  $\eta = 0,5$  – к.п.д. насоса и электродвигателя;  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  – плотность воды;  $\beta = 1,2$  – коэффициент запаса мощности насоса.

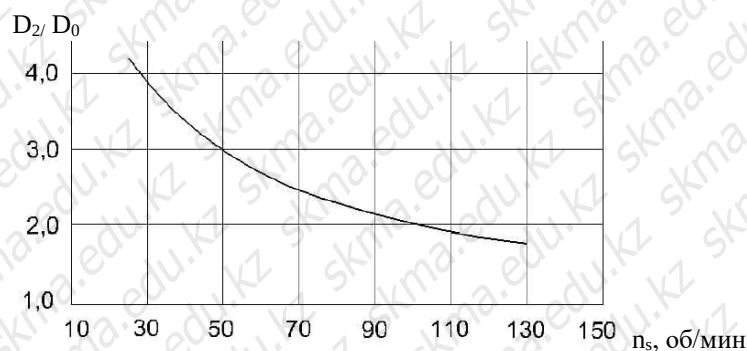


Рисунок 3. График зависимости быстроходности насоса  $n_s$  от отношения диаметров рабочего колеса  $D_2 / D_0$ .

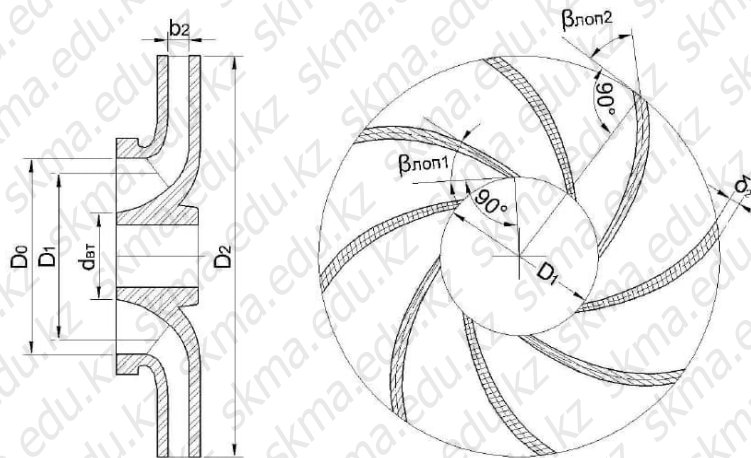


Рисунок 4. Эскиз рабочего колеса

## 5. Литература:

### Основная:

1. В.И. Чуешов, Е.В. Гладох, И.В. Сайко. Технология лекарств промышленного производства. Ч. 1. – Винница: Нова книга, 2014. -696 с.
2. В.И. Чуешов, Е.В. Гладох, И.В. Сайко. Технология лекарств промышленного производства. Ч. 2. –Винница: Нова книга, 2014. -664 с.
3. Промышленная технология лекарств, Том 1. Под ред. Чуешова В.И. – Х.: МТК-Книга, Издательства НФАУ, 2002 – 560 с.
4. Промышленная технология лекарств, Том 2. Под ред. Чуешова В.И. – Х.: МТК-Книга, Издательства НФАУ, 2002 – 557 с.
5. Мانتлер С. Н. Процессы и аппараты химической технологии : учебное пособие / С. Н. Мانتлер, Г. М. Жуманазарова. - Министерство образования и науки Республики Казахстан. - Алматы : "Бастау", 2018. - 256 с
6. Дытнерский Ю.И Процессы и аппараты химической технологии: В двух томах / Ю.И Дытнерский. — М.: Альянс, 2015. — 368 с.



|                                                                                                       |                                                                                  |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                  |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                  |                                                                                                  |

7. Дытнерский, Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию: Учебное пособие для вузов / Ю.И. Дытнерский, Г.С. Борисов, В. Брыков. - М.: Альянс, 2015. - 496 с.
8. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов / А.Г. Касаткин. - М.: Альянс, 2014. - 752 с.
9. Остриков А.Н. Процессы и аппараты. Расчет и проектирование аппаратов для тепловых и тепломассообменных процессов: Учебное пособие / А.Н. Остриков, В.Н. Василенко и др. - СПб.: Лань, 2018. - 440 с.
10. Алексеев, Г.В. Виртуальный лабораторный практикум по курсу «Процессы и аппараты пищевых производств»: Уч. Пособие / Г.В. Алексеев, И.И.

#### дополнительная:

11. Пляксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. - М.: КолосС, 2008. - 760 с.
12. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. - М.: Колос, 2000.
13. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии - Л.: Химия, 1987
14. Государственная Фармакопея Республики Казахстан. - том 1 - Алматы. - Издательский дом: «Жибек жолы». - 2008. - 592 с.
15. Государственная Фармакопея Республики Казахстан. - том 2. - Алматы. - Издательский дом: «Жибек жолы». - 2009. - 792 с.
16. Сағындыкова Б.А. Дәрілердің өндірістік технологиясы. - Алматы. - 2011. - 346 б.
17. Ақбердиев Ә.С. Тамақ өндірісінің процестері және аппараттары, Алматы; 1998 ж.

## Контроль (вопросы, тесты, задачи и пр.)

### Задания в тестовой форме

1~По принципу действия насосы делятся на ... .

| объемные, лопастные, вихревые и осевые  
| фиктивные, лопастные, движущиеся и осевые  
| объемные, уровневые, шероховатые и роторные  
| капельные, сжимаемые, осадительные и осевые  
| отстойные, центробежные, непрерывные и периодические

2~Работа объемных насосов основана на ...

| вытеснении жидкости из замкнутого пространства движущимися телами  
| перекачивании жидкости за счет энергии вихрей  
| интенсивном возникновении и разрушении вихрей в рабочих колесах  
| создании давления за счет центробежных сил при вращении колес в корпусе  
| разделении жидких и газовых неоднородных систем

3~ К объемным насосам относятся ... насосы.

| поршневые, ротационные, винтовые, шестеренные и пластинчатые  
| центробежные, вихревые, лопастные, отстойные и осевые  
| пластинчатые, объемные, уровневые, шероховатые и роторные  
| струйные, монтежю, напорные, поршневые, осевые и вихревые  
| интенсивные, центробежные, лопастные, жидкостные и винтовые

4~ К основным параметрам насосов относятся ... .

| подача, напор и потребляемая мощность  
| режим, давление и высота всасывания  
| скорость, потери и давление нагнетания  
| объем, нагнетание и периодичность циклов  
| скорость, подача и обеспечение давления

5~ Подача насоса это ... .

| объемный расход жидкости, подаваемой насосом в нагнетательный трубопровод  
| удельная энергия, сообщаемая насосом единице массы перекачиваемой жидкости  
| энергия, затрачиваемая на создание в жидкости потенциальной энергии давления  
| отношение центробежной силы к силе тяжести  
| сила тяжести, которая имеет место при относительном покое

6~ Напор насоса это ... .

| удельная энергия, сообщаемая насосом единице массы перекачиваемой жидкости  
| объемный расход жидкости, подаваемой насосом в нагнетательный трубопровод  
| энергия, затрачиваемая на создание в жидкости потенциальной энергии давления  
| отношение центробежной силы к силе тяжести  
| сила тяжести, которая имеет место при относительном покое

7~ Полезная мощность насоса это ... .

|                                                                                                       |                                                                                  |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                  |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                  |                                                                                                  |

| энергия, затрачиваемая на создание в жидкости потенциальной энергии давления  
 | удельная энергия, сообщаемая насосом единице массы перекачиваемой жидкости  
 | объемный расход жидкости, подаваемой насосом в нагнетательный трубопровод  
 | отношение центробежной силы к силе тяжести  
 | сила тяжести, которая имеет место при относительном покое

8~ Полезная мощность насоса определяется ... .

|  $N_{\text{п}} = \rho g V H$

|  $N_{\text{п}} = \rho g V S$

|  $N_{\text{п}} = \rho g V H$

|  $N_{\text{п}} = \rho g V H$

|  $N_{\text{п}} = \rho g S H$

9~ КПД поршневых насосов составляет ... .

| 0,8...0,9

| 0,7...0,95

| 0,6...0,7

| 0,65...0,8

| 0,6...0,9

10~ КПД центробежных насосов составляет ... .

| 0,7...0,95

| 0,8...0,9

| 0,6...0,7

| 0,65...0,8

| 0,6...0,9

11~ Определите установившуюся мощность двигателя.

|  $N_{\text{уст}} = \beta N_{\text{дв}}$

|  $N_{\text{уст}} = \alpha N_{\text{дв}}$

|  $N_{\text{уст}} = \beta / N_{\text{дв}}$

|  $N_{\text{уст}} = \beta N H$

|  $N_{\text{уст}} = \rho V_{\text{дв}}$

12~ Определите единицу измерения подачи насоса.

|  $\text{м}^3/\text{с}$

|  $\text{м}^3/\text{кг}$

|  $\text{с}/\text{м}^3$

| Вт

| м

13~ Определите единицу измерения напора насоса.

| м

|  $\text{м}^3/\text{с}$

|  $\text{м}^3/\text{кг}$

|  $\text{с}/\text{м}^3$

| Вт

14~ Определите единицу измерения полезной мощности насоса.

| Вт

| м

|  $\text{м}^3/\text{с}$

|  $\text{м}^3/\text{кг}$

|  $\text{с}/\text{м}^3$

15~ Кавитация это ... .

| процесс парообразования и последующего схлопывания пузырьков пара с одновременной конденсацией  
 | пара в потоке жидкости

| явление сопровождаемое по принципу вытеснения жидкости

| удельная энергия, сообщаемая насосом единице массы перекачиваемой жидкости

| неравномерная подача жидкости под давлением

| система, возникшая под воздействием охлаждающего агента

16~ Поршневые насосы работают по принципу ... .

| вытеснения жидкости из цилиндров движущимся возвратно-поступательным плунжером

| преобразовании кинетической энергии потока в потенциальную энергию давления



|                                                                                                       |                                                                                   |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                   |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                   |                                                                                                  |

| перекачивании жидкости за счет энергии вихрей, образующиеся при интенсивном возникновении вихрей  
| создании давления за счет центробежных сил при вращении колес в корпусе  
| разделении жидких и газовых неоднородных систем  
17~Центробежные насосы работают по принципу ...  
| преобразовании кинетической энергии потока в потенциальную энергию давления  
| перекачивании жидкости за счет энергии вихрей, образующиеся при интенсивном возникновении вихрей  
| создании давления за счет гравитационных сил при вращении колес в корпусе  
| разделении жидких и газовых неоднородных систем  
| вытеснения жидкости из цилиндров движущимся возвратно-поступательным плунжером  
18~ Поршневые насосы применяются при напоре ...  
| от 5 до 100 МПа  
| от 15 до 200 МПа  
| от 0 до 10 МПа  
| от 20 до 1000 МПа  
| от 5 до 1000 МПа  
19~Поршневые насосы применяются для перекачивания .... жидкостей  
| высоковязких и огнеопасных  
| низковязких и огнеопасных  
| вязких и невязких  
| осветлённой и фильтрующей  
| низконапорной и безнапорной  
20~ Укажите основное уравнение центробежного насоса.  
| уравнение Эйлера  
| уравнение Бернулли  
| уравнение Навье-Стокса  
| уравнение Никурадзе  
| уравнение Дарси-Вейсбаха

### Тема 7: Гидродинамика псевдоожиженного слоя.

**Цель:** Ознакомление с работой аппаратов с псевдоожиженным слоем.

**Задачи обучения:**

**Студент должен знать:**

- Физические основы псевдоожижения;
- Пределы существования псевдоожиженного слоя;
- Структуру псевдоожиженного слоя.

**Студент должен уметь:**

- Определять характерные скорости оживающего агента;
- Определять средний диаметр частиц;
- Определять эквивалентный диаметр для частиц неправильной формы.
- Определять гидравлическое сопротивление неподвижного и псевдоожиженного слоев.

**Основные вопросы темы:**

1. Характерные скорости оживающего агента для псевдоожиженного слоя
2. Средний диаметр частиц находящихся в слое.
3. Зависимость порозности слоя от скорости оживающего агента
4. Гидравлическое сопротивление неподвижного и псевдоожиженного слоев.
5. Эквивалентный диаметр для частиц неправильной формы.

**Методы обучения и преподавания:**

Студенты должны разобраться с работой аппаратов с псевдоожиженным слоем. На виртуальной лабораторной установке:

1. Пройти тестирование по основным характеристикам псевдоожиженного слоя.
2. Получить экспериментальные зависимости  $\Delta P$  и  $\varepsilon$  от скорости оживающего агента.
3. Определить по экспериментальным данным значение первой критической скорости.

|                                                                                                       |                                                                                   |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| <p>Кафедра инженерных дисциплин<br/>Методические указания для лабораторных занятий</p>                |                                                                                   |                                                                                                  |

4. Определить диаметр частиц слоя или эквивалентный диаметр и фактор формы для частиц неправильной формы.
5. Определить по зависимости форм значение второй критической скорости. Сравнить его с расчетом по формуле Тодеса.
6. Рассчитать вес материала в слое.

#### Теоретические сведения

Для интенсификации процессов тепло- и массообмена, процессов смешения сыпучих материалов, агломерации, гранулирования и других процессов широко используются аппараты с псевдоожиженным слоем (ПС) зернистого материала (взвешенный, кипящий слой).

Если через неподвижный слой материала, лежащего на решетке (рис. 9.1), пропустить снизу вверх поток оживающего агента (жидкость или газ), то состояние слоя будет определяться скоростью оживающего агента; то есть расходу агента, отнесенному к полному поперечному сечению пустого аппарата:

$$w = \frac{V}{f_a} \quad (9.1)$$

где  $V$  – объемный расход оживающего агента,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$$f_a = \frac{\pi d^2}{4} \text{ – площадь поперечного сечения аппарата, } \text{м}^2;$$

$d$  – диаметр поперечного сечения аппарата,  $\text{м}$ .

Все расчеты по определению параметров псевдоожиженного слоя основаны именно на использовании скорости оживающего агента (9.1). Это связано с тем, что измерить действительную скорость воздуха в промежутках между твердыми частицами трудно.

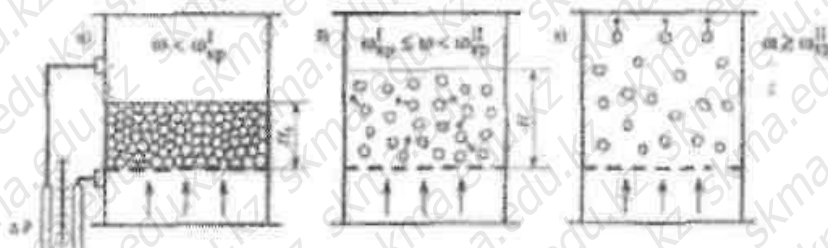


Рисунок 9.1 Изменение структуры слоя в зависимости от скорости оживающего агента: а) неподвижный слой; б) псевдоожиженный слой; в) унос частиц из аппарата.

При скоростях потока ниже первой  $w_{кр}^I$  (скорость начала псевдоожижения) слой остается неподвижным (НС). Оживающий агент движется через слой в режиме фильтрации.

При достижении агентом первой критической скорости  $w_{кр}^I$  слой переходит в ПС. При этом твердые частицы начинают перемещаться по слою. Дальнейшее увеличение скорости приводит к увеличению высоты слоя (слой расширяется).

При достижении оживающим агентом второй критической скорости  $w_{кр}^{II}$  (скорость уноса) слой разрушается, а частицы в режиме пневмотранспорта уносятся из аппарата.

Расширение ПС характеризуется порозностью  $\varepsilon$ , которая определяется как отношение объема пустот  $V_{II}$  в слое, к объему всего слоя  $V_{сл}$ :

$$\varepsilon = \frac{V_{II}}{V_{сл}} = \frac{V_{сл} - V_T}{V_{сл}} = 1 - \frac{V_T}{V_{сл}} \quad (9.2)$$

где  $V_T$  – объем занимаемый твердыми частицами в слое,  $\text{м}^3$ ;

$V_{сл} = f_a H$  – объем слоя,  $\text{м}^3$ ;

$H$  – высота псевдоожиженного слоя,  $\text{м}$ .

Известно, что порозность неподвижного слоя твердых частиц одинакового диаметра составляет приблизительно 0,4. В процессе псевдоожижения объем  $V_T$  остается величиной постоянной, следовательно, его можно определить по параметрам неподвижного слоя:



|                                                                                                       |                                                                                  |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| <p>Кафедра инженерных дисциплин<br/>Методические указания для лабораторных занятий</p>                |                                                                                  |                                                                                                  |

$$V_T = f_a \cdot H_0(1 - \varepsilon) \quad (9.3)$$

где  $H_0$  – высота неподвижного слоя частиц, м.

Подставив (9.3) в (9.2) получим формулу для расчета порозности по измеренным значениям высот слоя:

$$\varepsilon = 1 - \frac{f_a \cdot H_0(1 - \varepsilon_0)}{f_a \cdot H} = 1 - (1 - \varepsilon_0) \frac{H_0}{H} \quad (9.4)$$

Из формулы (9.4) видно, что с увеличением скорости ожижающего агента порозность слоя растет. При скорости уноса, предельной для псевдоожиженного слоя, можно считать, что  $V_{cl} \geq V_T$  следовательно  $\varepsilon = 1$ . Таким образом, псевдоожиженный слой может осуществляться в пределах:

$$\text{от } \varepsilon = \varepsilon_0 = 0,4 (w < w_{кр}^I) \quad \text{до} \quad \varepsilon = 1 (w \geq w_{кр}^I)$$

С некоторыми приближениями эти пределы можно принять и для частиц неправильной формы.

Слой твердых частиц является для ожижающего агента гидравлическим сопротивлением, следовательно, дифференциальным манометром (рис. 9.1) можно измерить перепад давления, возникающий при движении сжижающего агента через этот слой.

На рисунке 9.2 показаны графики типичных изменений гидравлического сопротивления слоя  $\Delta P$  и порозности  $\varepsilon$ .

В момент начала псевдоожижения вес зернистого материала приходящейся на единицу площади поперечного сечения аппарата, уравнивается силой гидравлического сопротивления слоя.

$$\Delta P_C = \frac{G_c}{f_a} \quad (9.5)$$

где  $G_c$  – вес материала в слое, Н.

С учетом архимедовых сил, используя формулы (9.3) и (9.5), получим:

$$\Delta P_C = gH_0(\rho_c - \rho_s)(1 - \varepsilon_0) \quad (9.6)$$

Так как сопротивление ПС остается величиной постоянной, то его можно определить по формуле (9.6) для любого значения  $\varepsilon$ :

$$\Delta P_C = gH(\rho_c - \rho_s)(1 - \varepsilon_0) \quad (9.7)$$

Если  $\rho_c \gg \rho_s$  (например, система газ – твердые частицы), то формулу можно записать:

$$\Delta P_C = gH_0\rho_c(1 - \varepsilon_0) \quad (9.8)$$

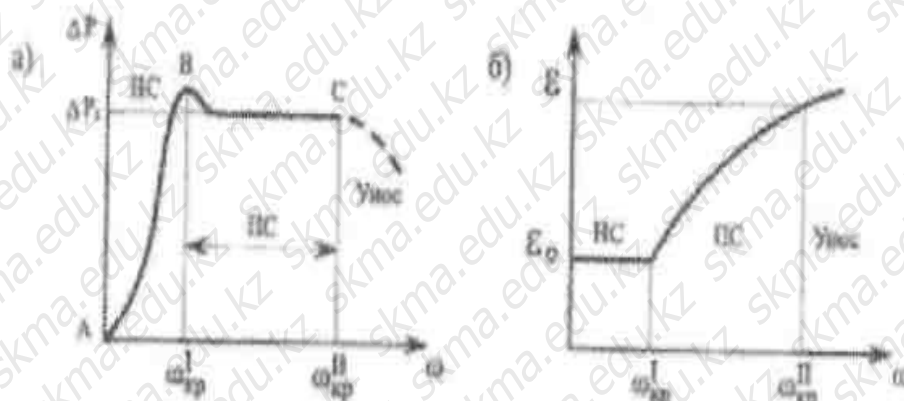


Рисунок 9.2. Зависимости: а)  $\Delta P = f(w)$ ; б)  $\varepsilon = f(w)$ .

Из графика (рис. 9.2) видно, что гидравлическое сопротивление псевдоожиженного слоя остается величиной постоянной и не зависит от скорости ожижающего агента. Это постоянство обусловлено тем, что для частиц, находящихся во взвешанном состоянии, выполняется следующее соотношение:

$$G = R + A \quad (9.9)$$

где  $G = mg = V_q \cdot \rho_q g$  – сила тяжести, Н;

$$R = \xi \frac{\rho_c w_0^2}{2} f \text{ – сила сопротивления твердой частицы, Н;}$$

$$A = V_q \rho_q g \text{ – сила Архимеда, Н;}$$

$\xi$  – коэффициент сопротивления твердой частицы (зависит от режима обтекания);

$f$  – площадь поперечного сечения частицы, м<sup>2</sup>;

$m$  – масса частицы, кг;

$\rho_c$  – плотность ожидающего агента, кг/м<sup>3</sup>;

$V_q$  – объем твердой частицы, м<sup>3</sup>;

$\rho_q$  – плотность твердых частиц, кг/м<sup>3</sup>;

$w_0 = \frac{w}{\varepsilon}$  – действительная скорость ожижающего агента в промежутках между частицами, м/с.

Таким образом:

$$R = G - A \quad (9.10)$$

откуда:

$$R = \xi \frac{\rho_c w_0^2}{2} f = V_q g (\rho_q - \rho_c) \quad (9.11)$$

Поделив правую и левую части, уравнения (9.11) на  $f$  и подставив в него значение  $w_0$ , получим:

$$R = \xi \frac{\rho_c w^2}{2\varepsilon^2} = V_q g (\rho_q - \rho_c) / f \quad (9.12)$$

или при  $\rho_q \gg \rho_c$ :

$$\Delta P = \frac{V_q g \rho_q}{f} = \frac{mg}{f} \quad (9.13)$$

Из формулы (9.13) следует, что перепад давления, возникающий при псевдоожижении твердой частицы, равен массе частицы, деленной на площадь поперечного сечения частицы. Следовательно, когда все частицы слоя перейдут в псевдоожиженное состояние, перепад давления:

$$\Delta P = \frac{G_c}{f_c} \quad (9.14)$$

где  $G_c$  – вес частиц слоя, Н.

Из уравнения (9.13) и (9.14) видно, что перепад давления для псевдоожиженного слоя есть величина постоянная, независящая от скорости газа. Это постоянство для слоя объясняется тем, что при повышении расхода ожижающего агента происходит одновременно увеличение порозности слоя, а следовательно, действительная скорость ожижающего агента между частицами остается величиной постоянной (см. формулы (9.11) и (9.12)).

Расчет критических скоростей для псевдоожиженного слоя проводится с использованием зависимости между критериями Лященко и Архимеда (рис. 9.3):

$$Ly = f(Ar) \quad (9.15)$$

где  $Ly = \frac{w^3 \rho_c^2}{\mu_c (\rho_q - \rho_c) g}$  – критерий Лященко;

$$Ar = \frac{d^3 \rho_c (\rho_q - \rho_c) g}{\mu_c^2} \text{ – критерий Архимеда;}$$

$\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Для расчета критических скоростей можно воспользоваться формулой Тодеса, полученной из



|                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <p style="text-align: center;"> ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/> «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ </p>                                                                             |  |
| <p style="text-align: center;">  SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/> АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» </p> |  |
| <p style="text-align: center;">Кафедра инженерных дисциплин</p>                                                                                                                                                                  |  |
| <p style="text-align: center;">Методические указания для лабораторных занятий</p>                                                                                                                                                |  |

анализа экспериментальных данных:

$$Re = \frac{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61\sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}} \quad (9.16)$$

где  $Re = \frac{wd_{\text{ч}}\rho_c}{\mu_c}$  – критерий Рейнольдса.

Для расчета скорости начала псевдооживления ( $\varepsilon = \varepsilon_0 = 0,4$ ):

$$Re_{\text{кр}}^I = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \quad (9.17)$$

где  $Re_{\text{кр}}^I = \frac{w_{\text{кр}}^I d_{\text{ч}} \rho_c}{\mu_c}$

Для расчета скорости уноса ( $\varepsilon = 1$ ):

$$Re_{\text{кр}}^{II} = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} \quad (9.18)$$

где  $Re_{\text{кр}}^{II} = \frac{w_{\text{кр}}^{II} d_{\text{ч}} \rho_c}{\mu_c}$ .

Для частиц неправильной формы вместо  $d_{\text{ч}}$  используется эквивалентный диаметр  $d_{\text{э}}$ . Эквивалентный диаметр  $d_{\text{э}}$  для частиц неправильной формы вычисляют как диаметр условного шара  $d_{\text{ш}}$  (объем которого  $V$  равен объему реальной частицы), умноженный на фактор формы  $\varphi$ :

$$d_{\text{э}} = d_{\text{ш}} \cdot \varphi \quad (9.19)$$

где  $d_{\text{ш}} = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$  – диаметр условного шара, м;

$\varphi = \frac{f_{\text{ш}}}{f_{\text{ч}}} = \frac{\pi d_{\text{ш}}^2}{f_{\text{ч}}}$  – фактор формы;

$f_{\text{ч}}$  – поверхность реальной частицы, м<sup>2</sup>.

Фактор формы вычисляется как отношение поверхности частиц с диаметром  $d_{\text{ш}}$  к поверхности реальной частицы, причем фактор формы всегда меньше или равен единице.

Для полидисперсного слоя, состоящего из частиц разного диаметра:

$$d_{\text{э}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i}{d_i} \right)} \quad (9.20)$$

где  $n$  – число фракций;

$d_i = \frac{d_{i-1} + d_i}{2}$  – средний размер  $i$ -й фракции, м;

$d_{i-1}$  – размер проходного сита, м;

$d_i$  – размер непроходного сита, м;

$x_i = \frac{M_i}{\sum_{\gamma=1}^n M_{\gamma}}$  – массовая доля материала в  $i$ -й фракции;

$M_i$  – массовая доля материала на  $i$ -том сите, кг.

**Цель работы**

|                                                                                                       |                                                                                  |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ОҢТҮСТІК ҚАЗАҚСТАН<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| <p>Кафедра инженерных дисциплин<br/>Методические указания для лабораторных занятий</p>                |                                                                                  |                                                                                                  |

1. Получить экспериментальные зависимости  $\Delta P$  и  $\varepsilon$  от скорости ожижающего агента.
2. Определить по экспериментальным данным значение первой критической скорости.
3. Определить диаметр частиц слоя или эквивалентный диаметр и фактор формы для частиц неправильной формы.
4. Определить по зависимости  $Lu = f(Ar)$  значение второй критической скорости. Сравнить его с расчетом по формуле Тодеса.
5. Рассчитать вес материала в слое.

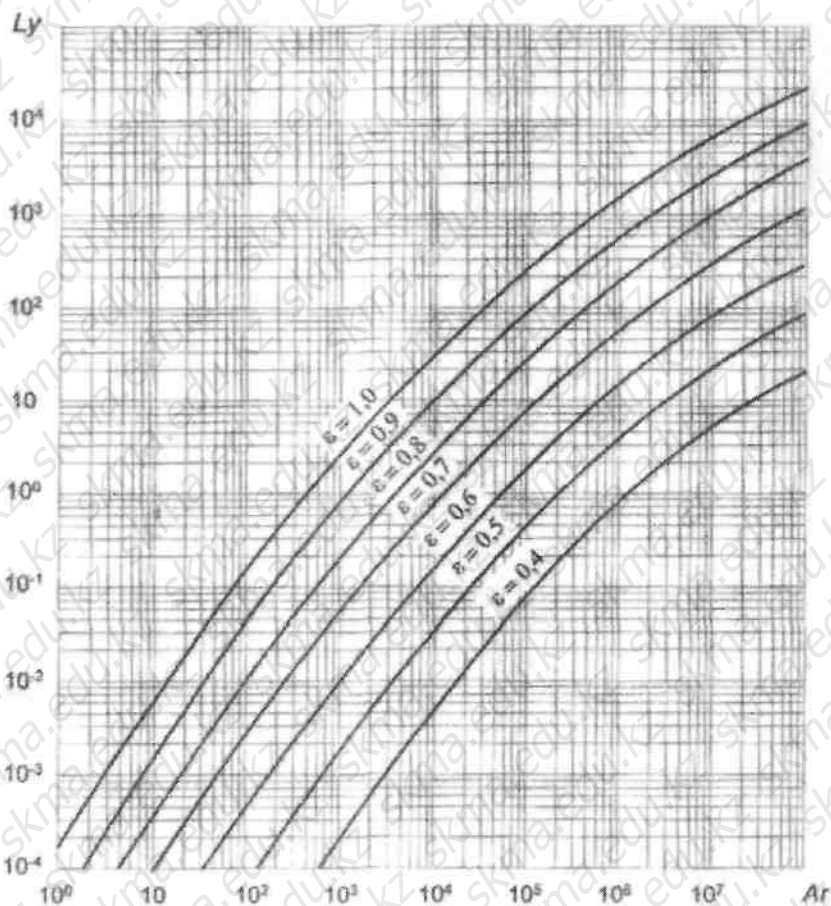


Рисунок 9.3. Зависимость критерия  $Lu$  от критерия  $Ar$  и порозности слоя  $\varepsilon$ .

#### Описание экспериментальной установки

Установка состоит из двух смонтированных на щите стеклянных цилиндрических колонок 1 и 2. В каждой колонке имеются три металлические сетки, являющиеся газораспределителями. На двух сетках – слои из твердых частиц. Ожидающий агент (воздух) с помощью вентилятора 3 поступает в объемный счетчик 4, а затем через вентили 5 и 6 поступает соответственно либо в колонку 1, либо 2. Расход воздуха регулируется путем изменения напряжения, подводимого к электродвигателю 7 от регулятора напряжения 8, который через выключатель 9 соединяется с сетью. Перепад давления, возникающий при движении воздуха через колонки, измеряется дифференциальными манометрами 10 и 11, которые с помощью переключателей 12 и 13 могут быть подключены к любой из точек. Переключатели каждой колонки имеют три положения – а, б, в.



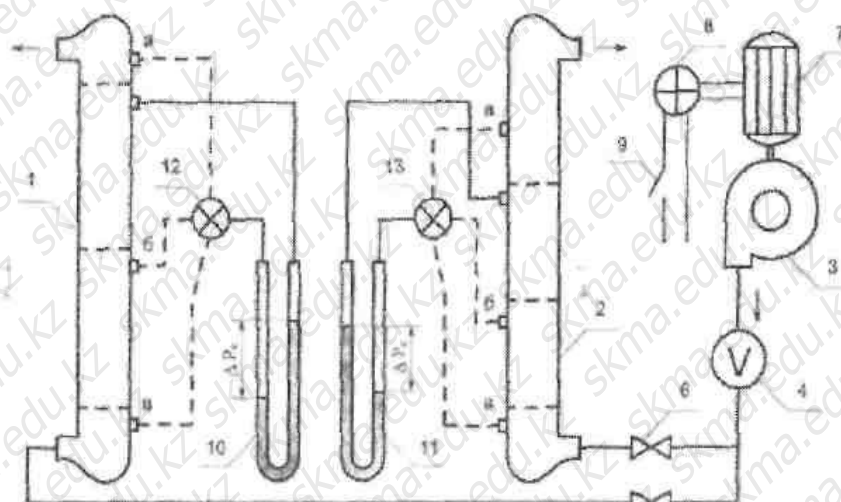


Рисунок 9.4. Схема экспериментальной установки

### Методика выполнения работы

Перед пуском установки следует ознакомиться с содержанием работы, установкой и получить задание у преподавателя.

1. В соответствии с заданием открыть один из вентилялей 5 или 6 (второй должен быть закрыт).
2. Ручку регулятора напряжения вывести на нуль, а выключатель 9 поставить в положение «сеть».
3. Установив регулятором напряжения расход воздуха через колонку, с помощью соответствующего переключателя последовательно измеряют по дифманометру перепады давления (формулы для дальнейших расчетов приведены в таблице 9.1).

Таблица 9.1

| Положение переключателя | Измеряемая величина                                  |
|-------------------------|------------------------------------------------------|
| а                       | $\Delta P_a = \Delta P_p$                            |
| б                       | $\Delta P_б = \Delta P_p + \Delta P_1$               |
| в                       | $\Delta P_в = 2\Delta P_a + \Delta P_1 + \Delta P_2$ |

Здесь  $\Delta P_p$  – перепад давления, возникающий при движении охлаждающего агента через сетку;  $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$  – соответственно перепад давления на первом и втором слоях.

В каждом опыте необходимо замерить высоты исследуемых слоев твердых частиц.

Расход воздуха измерить с помощью объемного счетчика. Результаты измерения занести в отчетную таблицу 9.2.

5. Последовательно изменяя расход воздуха, провести измерения указанных выше величин.

Измерения должны схватывать диапазон изменения скорости воздуха от нуля до наибольшей, которую обеспечивает вентилятор. Измерения следует организовать так, чтобы обеспечить определение первой критической скорости с максимально возможной точностью.

После окончания работы выключатель 9 поставить в положение «выкл» и ручку регулятора

|                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <p style="text-align: center;"> ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/> «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ </p>                                                                             |  |
| <p style="text-align: center;">  SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/> АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» </p> |  |
| <p style="text-align: center;">Кафедра инженерных дисциплин</p>                                                                                                                                                                  |  |
| <p style="text-align: center;">Методические указания для лабораторных занятий</p>                                                                                                                                                |  |

напряжения вывести на ноль.

### Обработка опытных данных и составление отчета

1. Определить скорость воздуха  $w$ , м/с по формуле (9.1):

$$w = \frac{V}{f_a} = \frac{V_K - V_H}{\tau} \cdot \frac{4}{\pi \cdot d^2}$$

2. Рассчитать гидравлическое сопротивление слоев твердых частиц  $\Delta P_1$ , переводя при этом показания дифференциального манометра из миллиметров водяного столба в Паскали. Если сопротивление  $\Delta P_p \ll \Delta P_1$ , то сопротивлением сетки при расчетах можно пренебречь.

3. Построить график зависимости  $\Delta P_1 = f(w)$ , на котором нанести данные для каждого из слоев. Из графика определить значение  $w_{кр}^I$ .

4. По формуле (3.4) рассчитать порозность и построить график зависимости  $\varepsilon = f(w)$ , на котором нанести данные для каждого из слоев.

5. Расчет значений плотности и динамической вязкости воздуха можно проводить по следующим формулам:

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{T};$$

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left( \frac{T}{273} \right)^{3/2},$$

где  $\rho_0 = 1,293$  – плотность воздуха при  $0^\circ\text{C}$ , кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_0 = 17,3 \cdot 10^{-6}$  – динамический коэффициент вязкости воздуха при  $0^\circ\text{C}$ ,  
Па·с;

$T = 273 + t$  – абсолютная температура, К;

$C$  – постоянная Сатерленда (для воздуха  $C = 124$ ).

6. Определить средний диаметр частиц в слое  $d_i$ . По значению  $w_{кр}^I$  рассчитать критерий Лященко.

Так как,  $\rho_i \gg \rho_c$ , то в формулу (9.15) принять  $\rho_i - \rho_c \approx \rho_i$ . Затем по графику (рис. 9.3) найти соответствующее значение критерия Архимеда при  $\varepsilon = 0,4$  и определить диаметр частиц  $d_i$ .

7. Рассчитать по известному  $d_i$  значение  $w_{кр}^I$  и  $w_{кр}^{II}$ , исходя из формулы Тодеса.

8. Рассчитать вес твердых частиц, находящихся в каждом слое, по формуле (9.14).

9. Отчет о работе должен содержать: задание; схему установки со спецификацией; отчетную таблицу (табл. 9.2.); графики  $\Delta P_1 = f(w)$ ; расчет среднего диаметра частиц; расчет веса материала в каждом слое; расчет  $w_{кр}^{II}$ ; расчет  $w_{кр}^I$  и  $w_{кр}^{II}$  по формуле Тодеса.

### Исходные данные

Диаметр аппарата  $D = 41 \cdot 10^{-3}$  м.

Материал – пшено.

Плотность твердых частиц  $\rho_i = 1320$  кг/м<sup>3</sup>.

Номер колонны 1.

Порозность псевдоожиженного слоя  $\varepsilon_0 = 0,4$

Температура воздуха  $t = 19^\circ\text{C}$ .

Таблица 9.2



| <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/> <b>MEDISINA<br/> AKADEMIASY</b><br/> «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ </div> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;"> SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL<br/> ACADEMY</b><br/> АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» </div> </div> |                                                                    |                                           |                                                          |                          |                                    |                                                                |                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                    |                                           |                                                          |                          |                                    |                                                                |                                          |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                    |                                           |                                                          |                          |                                    |                                                                |                                          |
| №<br>п/п                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Опытные данные                                                     |                                           |                                                          |                          | Расчетные данные                   |                                                                |                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Показания<br>объемного<br>счетчика,<br>$\text{м}^3$<br>$V_k - V_n$ | Время<br>измерения<br>объема, с<br>$\tau$ | Показания<br>дифманометра<br>в мм.вод. ст.<br>$\Delta P$ | Высота<br>слоя, м<br>$H$ | Скорость<br>воздуха,<br>м/с<br>$w$ | Гидравличес<br>кое<br>сопротивлен<br>ие слоя, Па<br>$\Delta P$ | Порозн<br>ость<br>слоя,<br>$\varepsilon$ |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                    |                                           |                                                          |                          |                                    |                                                                |                                          |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                    |                                           |                                                          |                          |                                    |                                                                |                                          |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                    |                                           |                                                          |                          |                                    |                                                                |                                          |
| 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                    |                                           |                                                          |                          |                                    |                                                                |                                          |
| 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                    |                                           |                                                          |                          |                                    |                                                                |                                          |

### Порядок выполнения виртуальной лабораторной работы

Данная виртуальная работа в отличие от стационарной установки (рис. 9.4) содержит только одну цилиндрическую стеклянную колонку с единственной сеткой, на которой находится слой пшеницы высотой  $H = 40$  мм. Дифференциальный манометр подключен с одной стороны в точке – расположенной ниже сетки, соответствующей точке «в» (рис. 9.4), а с другой – вверху колонки, соответствующей точке «а» (рис. 9.4).

Для подключения лабораторной установки к электрической сети необходимо нажать красную кнопку «Вкл», после чего она станет светлой и недоступной для дальнейшего управления. Однако одновременно активизируется кнопка управления регулятором напряжения, с помощью которой можно изменять его параметры, а значит и энергию, подаваемую на двигатель вентилятора. Для этого достаточно поместить курсор в активную красную область рычага управления регулятором напряжения и, нажимая первую кнопку мыши, одновременно перемещать ее вправо. О количестве подаваемой энергии к двигателю вентилятора можно судить по числу оборотов объемного счетчика, фиксирующего расход вырабатываемого воздуха.

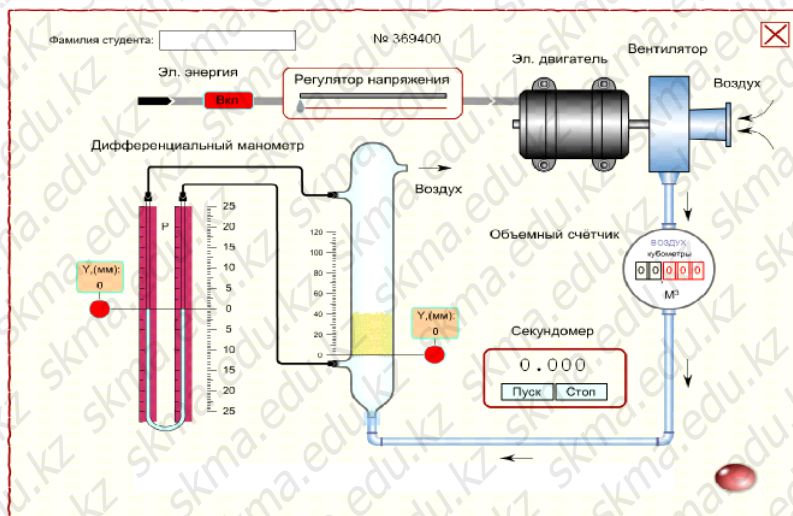
Для точной оценки расхода обычно регистрируют время, за которое через объемный счетчик пройдет  $0,03 \text{ м}^3$  воздуха. Время измеряют при помощи виртуального секундомера, включенного в состав виртуальной лабораторной работы. Пользоваться любым другим секундомером нельзя. Для включения виртуального секундомера необходимо нажать кнопку «Пуск». Сбросить его показания можно левой кнопкой мыши при наведении курсора на активную область показаний. Кроме того, управлять секундомером можно при помощи клавиатуры: клавиша «P» – пуск, клавиша «S» – стоп, клавиша «O» – обнулить.

Измерение высот столбиков воды в дифференциальном манометре и высоты слоя пшеницы также производится нажатием левой кнопки мыши при наведении курсора на активную красную область соответствующей измерительной линии и одновременным перемещением мыши вверх – вниз. Для повышения точности измерения столбиков воды дифференциальный манометр изображен в увеличенном масштабе.

При проведении работы необходимо избегать резких движений рычага управления регулятором напряжения, чтобы исключить возможное нарушение штатного режима работы объемного счетчика. Напротив, для точного определения момента начала оживления в соответствии с показаниями манометра, следует изменять напряжение медленно и плавно.

Для увеличения достоверности воспроизведения процесса оживления каждая частица слоя движется по индивидуальному закону (траектории), и потому при выполнении данной виртуальной лабораторной работы число обрабатываемой Вашим компьютером информации в единицу времени весьма велико, а отсюда требования к быстродействию компьютера также повышены. Для естественного воспроизведения процесса оживления частота процессора Вашего компьютера не должна быть ниже  $1 \text{ ГГц}$ . Это не значит, что при выполнении данной работы на компьютерах с меньшей тактовой частотой будут получены недостоверные результаты. Это означает только то, что процесс воспроизведения будет несколько замедленным, но показания виртуального секундомера при этом останутся достоверными.

|                                                                                                       |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| <p>Кафедра инженерных дисциплин</p>                                                                   |                                                                                                  |
| <p>Методические указания для лабораторных занятий</p>                                                 |                                                                                                  |



## 5 Литература

### Основная:

- 1 Промышленная технология лекарств, Том 1. Под ред. Чушова В.И. – Х.: МТК-Книга, Издательства НФАУ, 2002 – 560 с.
- 2 Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: ООО ТИД "Альянс", 2004. – 753 с.
- 3 Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. В 2-х кн. / Ю.И.Дытнерский. – М.: Химия, 2002. – 400– 368 с
- 4 Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков; под ред. П.Г. Романкова. - 14-е изд., стер. - М.: Альянс, 2007. С. 576
- 5 Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию: Учебное пособие для студ. химико-технологических спец. вузов; Допущено Гос. комитетом СССР / Г. С. Борисов [и др.]; под ред. Ю.И. Дытнерского. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Альянс, 2008.- 496 с
- 6 Плаксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. – М.: Колос, 2008. – 760 с.
- 7 Ешова Ж.Т. Химиялық технологияның негізгі процестері мен аппараттары: Оқу құралы. – Алматы Қазақ университеті, 2007. – 237б.
- 8 Акбердиев Ә.С., Ханкожаев Ш.Х., Омарқұлов П.К. Тамақ өндірісінің процестері және аппараттары, 2-ші бөлім, Шымкент, 2004 ж.
- 9 Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. - М.: Колос, 2000.
- 10 J. F. Richardson and J. H. Harker. Chemical Engineering. V2. Fifth edition. Linacre House, Jordan Hill, Oxford: Butterworth –Heinemann, 2002. – 1183 p.

### Дополнительная:

- 11 Муравьев И. А. Технология лекарств. Изд. 3-е, перераб. и доп. Т. I, М., «Медицина», 1980, 704 с, ил.
- 12 Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. 3-е изд. - Л.: Химия.,
- 13 Жужиков В.А. Фильтрация. 4-е изд. М.: Химия, 1986
- 14 Акбердиев Ә.С., Молдабеков Ш.М. Химиялық технологияның негізгі процестері және аппараттары, 1-ші бөлім, Алматы; 1993 ж.
- 15 Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. В 5Т. Т1//Под ред. А.М. Кутепова – М.: Логос, 2001
- 16 Фармацевтическая технология. Под ред. И.И. Краснюка и Г.В. Михайловой–Москва, Академия – 2006 г.

## Контроль (вопросы, тесты, задачи и пр.)

### Контрольные вопросы

1. Как рассчитать характерные скорости оживающего агента для псевдооживленного слоя
2. Как определяется по экспериментальным данным скорость начало псевдооживления



|                                                                                                       |                                                                                   |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                   |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                   |                                                                                                  |

3. Как рассчитать средний диаметр частиц находящихся в слое
4. Что такое порозность и какой характер имеет зависимость порозности слоя от скорости оживающего агента
5. От чего зависят: скорость начала псевдооживления и скорость уноса
6. Почему с увеличением скорости оживающего агента гидравлическое сопротивление неподвижного слоя растет, а псевдооживленного остается постоянным
7. Как рассчитать эквивалентный диаметр для частиц неправильной формы
8. Как пользоваться графиком зависимости форм
9. Как рассчитать гидравлическое сопротивление псевдооживленного слоя, зная вес неподвижного слоя

#### Задания в тестовой форме

1. Псевдооживление зернистого материала характеризуется перемещением его частиц относительно друг друга за счет подвода энергии от ...
  - | экстрактора
  - | **оживающего агента**
  - | теплообменного аппарата
  - | центрифуги
  - | нагревающего агента
2. Псевдооживленный слой образуется при восходящем движении оживающего агента через слой зернистого материала со скоростью ...
  - | выше второй критической
  - | выше скорости звука
  - | **выше первой критической**
  - | выше скорости уноса
  - | ниже первой критической
3. Укажите достоинств опсевдооживления.
  - | **Интенсивное перемешивание твердой фазы.**
  - | Текучесть псевдооживленного слоя.
  - | Интенсивное истирание частиц в псевдооживленном слое.
  - | Унос частиц с оживающим агентом.
  - | Неравномерное перемешивание частиц в слое.
4. Укажите недостаток псевдооживления.
  - | Интенсивное перемешивание твердой фазы.
  - | **Интенсивное истирание частиц в псевдооживленном слое.**
  - | Низкая производительность.
  - | Высокая скорость движения оживающего агента.
  - | Текучесть псевдооживленного слоя.
5. Укажите число псевдооживления.
  - | Отношение рабочей скорости к действительной скорости.
  - | **Отношение рабочей скорости к скорости начала псевдооживления.**
  - | Разница между скоростью начала псевдооживления и скоростью уноса.
  - | Отношение рабочей скорости к скорости уноса частиц.
  - | Отношение рабочей скорости ко второй критической скорости
6. Объем свободного пространства между частицами в единице объема, занятого слоем, представляет собой:
  - | удельная поверхность
  - | **порозность слоя**
  - | свободная поверхность
  - | неоднородный слой
  - | псевдооживленный слой
7. Скорость, равная отношению объемного расхода жидкости ко всей площади поперечного сечения слоя, называется:
  - | скоростью пневмотранспорта
  - | скоростью фонтанирования
  - | **фиктивной скоростью**
  - | скоростью псевдооживления
  - | свободной скоростью
8. Скорость, при которой нарушается неподвижность слоя и он начинает переходить в движение, называется:
  - | фиктивной скоростью
  - | скоростью пневмотранспорта
  - | скоростью фонтанирования
  - | свободной скоростью

|                                                                                                       |                                                                                  |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ОҢТҮСТІК ҚАЗАҚСТАН<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                  |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                  |                                                                                                  |

**скоростью псевдооживления**

9. Скорость, при которой слой разрушается и начинается массовый унос частиц потоком жидкости или газа, называется:

скоростью псевдооживления

фиктивной скоростью

**скоростью пневмотранспорта**

скоростью фонтанирования

свободной скоростью

10. Учение о методах научного обобщения эксперимента является:

теория гидродинамики

наука о размерностях

теория вероятности

наука о постоянных величинах

**теория подобия**

#### Тема 8: Осаждение твердых частиц в жидкости под действием силы тяжести

**Цель:** Экспериментальное определение скорости осаждения твердых частиц в жидкостях в зависимости от диаметра частиц, их формы и физических свойств частицы и жидкости; построение экспериментальных зависимостей  $Re = C Ar^n$  или  $Ly = f(Ar)$  для различных режимов осаждения.

**Задачи обучения:**

Студент должен знать:

- классификация неоднородных систем.
- методы разделения неоднородных систем.
- материальный баланс процессов разделения.
- общие сведения о процессе отстаивания;

Студент должен уметь:

- составлять материальный баланс процесса отстаивания;
- определять объем осветленной жидкости;
- определять скорость осаждения твердых частиц;
- определять поверхность осаждения.

**Основные вопросы темы:**

1. Режимы осаждения твердых частиц.
2. Силы действующие на осаждающуюся частицу.
3. Осаждения сферических и несферических частиц.
4. Стесненное осаждение твердых частиц.
5. Методика расчета скорости осаждения частиц или размеров частиц.

**Методы обучения и преподавания:**

Студенты должны разобраться в процессах осаждения твердых частиц. На лабораторной установке:

1. Экспериментально определить скорости осаждения твердых частиц в различных жидкостях.



|                                                                                                       |                                                                                   |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                   |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                   |                                                                                                  |

2. Построить экспериментальные зависимости  $Re = C Ar^n$  и  $Ly = f(Ar)$  для различных режимов осаждения.
3. Определить коэффициенты  $C$  и  $n$ .
4. Сравнить полученные данные с известными расчетными формулами.

#### 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  $w_{oc}$ .

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

$$w_{oc} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d_T (\rho_T - \rho) g}{\zeta \rho}} \quad (5.1)$$

Экспериментально установлены три режима осаждения твердых частиц и, соответственно, коэффициенты сопротивления  $\zeta$  частиц в зависимости от числа Рейнольдса. В первой области, области ламинарного осаждения, при  $Re_{oc} < 2$ :

$$\zeta = 24/Re_{oc} \quad (5.2)$$

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

$$\zeta = 18,5 Re_{oc} \quad (5.3)$$

В третьей области, области развитой турбулентности, в пределах изменения  $500 < Re_{oc} < 20\,000$ :

$$\zeta \approx 0,44 \quad (5.4)$$

Зависимости (5.1)–(5.4) справедливы для осаждающихся одиночных сферических частиц диаметром  $d_T$ .

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

$$w_{oc,cf} = \frac{d_T^2 (\rho_T - \rho) g}{18\mu} \quad (5.5)$$

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 (5.5) для расчета  $w_{oc}$  нельзя.

В общем случае можно использовать критериальную зависимость:

$$Re = f(Ar, \zeta), \quad (5.6)$$

здесь  $Ar$  – критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{d_T^3 \rho (\rho_T - \rho) g}{18\mu} \quad (5.7)$$

С учетом зависимости (5.2) уравнение (5.5) примет вид:

$$Re = Ar/18 \quad (5.8)$$

При этом критическое значение числа Архимеда, ограничивающее существование ламинарного режима, будет  $Ar \leq 36$ .

В переходной области зависимость (11.6) принимает вид:

$$Re = 0,152 Ar^{0,175} \quad (5.9)$$

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

При развитом турбулентном осаждении:

$$Re = 1,74 Ar^{0,5} \quad (5.10)$$

В тех случаях, когда скорость осаждения задана или известна, для расчета диаметра осаждающихся частиц удобно использовать графическую зависимость  $Ly = f(Ar)$  (рис. 11.1), где критерий Лященко равен:

$$Ly = \frac{Re^3}{Ar} = \frac{w_{oc}^3 \rho^2}{\mu (\rho_T - \rho) g} \quad (5.11)$$

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

Расчеты  $w_{oc}$  при известном  $d_T$  для любого режима осаждения приближенно можно вести также с помощью графика, изображенного на рисунке. 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  $\psi$ :

|                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <p style="text-align: center;"> ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/> «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ </p>                                                                             |  |
| <p style="text-align: center;">  SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/> АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» </p> |  |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                                                                                                                                     |  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                                                                                                                                                   |  |

$$w_{oc} = \psi w_{oc,cf}. \quad (5.12)$$

Приведем 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 ( $h = 20r$ ) | 0,58   |
|                      |        |                       | 0      |

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

#### Описание установки

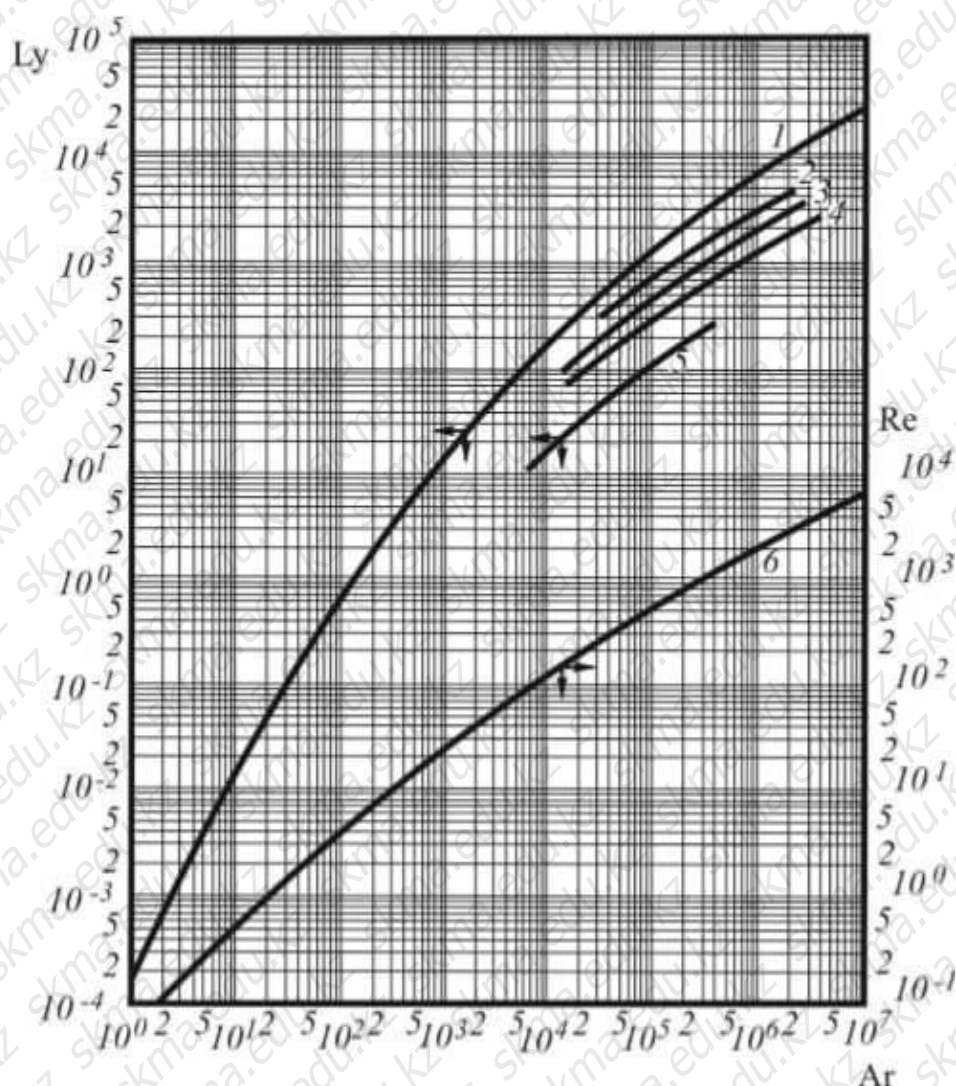
Установка состоит из трех стеклянных цилиндров ( $d_{\text{ц}} \geq 50$  мм), заполненных разными жидкостями. Вверху и внизу каждого цилиндра имеются метки, фиксирующие расстояния, которые частицы проходят в процессе осаждения. Замеряя секундомером время, в течение которого частица проходит расстояние 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.

При вычислении критериев  $Re$ ,  $Ag$  и  $Lu$  используют осредненные значения скорости осаждения  $w_{oc}$  и диаметра частиц  $d_t$ . Для определения скорости осаждения  $w_{oc}$  следует провести не менее 5 опытов, в каждом по 3–4 замера.

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





1 и 6 – шарообразные частицы; 2 – округленные; 3 – угловатые; 4 – продолговатые; 5 – пластинчатые.  
Рисунок 11.1. Зависимость Re и Ly от Ar для осаждения шарообразной частицы в неподвижной среде

### Порядок выполнения работы

Частицы сферической и неправильной формы известного или замеренного диаметра (или необходимых геометрических размеров) вводят в сосуд над поверхностью жидкости и аккуратно отпускают в жидкость. Секундомером фиксируют время прохождения частицы между метками. Каждый замер дублируют. Результаты опытов заносят в отчетную таблицу (табл.11.1)

При вычислении критериев Re, Ar и Ly используют осредненные значения скорости осаждения  $w_{ос}$  и диаметра частиц  $d_T$ . Для определения скорости осаждения  $w_{ос}$  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.

Таблица 11.1. Результаты замера и расчета при осаждении твердых частиц

| № опыта | № замера | Частицы | Жидкость | Время | Скорость осаждения |  |  |  |  |
|---------|----------|---------|----------|-------|--------------------|--|--|--|--|
|---------|----------|---------|----------|-------|--------------------|--|--|--|--|

|                                                                                                                          |  |                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p> ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/> «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ </p> |  |  <p> SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/> АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» </p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                             |  |                                                                                                                                                                                                       |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                                           |  |                                                                                                                                                                                                       |

|  | Материал,<br>г/см³ | d <sub>г</sub> , мм | ρ <sub>г</sub> , кг/м³ | V, м³ | Название | t, °C | ρ, кг/м³ | μ, Па·с | Экспер., w <sub>ос</sub> | Сф. расчет., w <sub>ос,сф</sub> | Re | Ar | Ly | ψ |
|--|--------------------|---------------------|------------------------|-------|----------|-------|----------|---------|--------------------------|---------------------------------|----|----|----|---|
|  |                    |                     |                        |       |          |       |          |         |                          |                                 |    |    |    |   |
|  |                    |                     |                        |       |          |       |          |         |                          |                                 |    |    |    |   |
|  |                    |                     |                        |       |          |       |          |         |                          |                                 |    |    |    |   |
|  |                    |                     |                        |       |          |       |          |         |                          |                                 |    |    |    |   |

На основе экспериментальных данных:

- 1) Вычисляют скорость осаждения в каждом замере;
- 2) Определяют значения критериев Re, Ar и Ly для каждого опыта;
- 3) Строят экспериментальные зависимости  $Re = C Ar^n$  и находят коэффициенты C и n, сравнивают полученные зависимости с расчетными формулами (11.8)–(11.10);
- 4) Наносят экспериментальные данные на график  $Ly = f(Ar)$ ;
- 5) Вычисляют с помощью зависимости  $Ly = f(Ar)$  и известной скорости осаждения фактор формы ψ для заданных некруглых частиц и сравнивают с приведенными выше данными.

## 5. Литература:

### Основная:

1. В.И. Чуешов, Е.В. Гладух, И.В. Сайко. Технология лекарств промышленного производства. Ч. 1. – Винница: Нова книга, 2014. – 696 с.
2. В.И. Чуешов, Е.В. Гладух, И.В. Сайко. Технология лекарств промышленного производства. Ч. 2. – Винница: Нова книга, 2014. – 664 с.
3. Промышленная технология лекарств, Том 1. Под ред. Чуешова В.И. – Х.: МТК-Книга, Издательства НФАУ, 2002 – 560 с.
4. Промышленная технология лекарств, Том 2. Под ред. Чуешова В.И. – Х.: МТК-Книга, Издательства НФАУ, 2002 – 557 с.
5. Мантлер С. Н. Процессы и аппараты химической технологии : учебное пособие / С. Н. Мантлер, Г. М. Жуманазарова. - Министерство образования и науки Республики Казахстан. - Алматы : "Бастау", 2018. - 256 с
6. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: В двух томах / Ю.И. Дытнерский. — М.: Альянс, 2015. — 368 с.
7. Дытнерский, Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию: Учебное пособие для вузов / Ю.И. Дытнерский, Г.С. Борисов, В.Брыков. - М.: Альянс, 2015. - 496 с.
8. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов / А.Г. Касаткин. - М.: Альянс, 2014. - 752 с.
9. Остриков А.Н. Процессы и аппараты. Расчет и проектирование аппаратов для тепловых и теплообменных процессов: Учебное пособие / А.Н. Остриков, В.Н. Василенко и др. - СПб.: Лань, 2018. - 440 с.
10. Алексеев, Г.В. Виртуальный лабораторный практикум по курсу «Процессы и аппараты пищевых производств»: Уч. Пособие / Г.В. Алексеев, И.И.

### дополнительная:

11. Плаксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. – М.: КолосС, 2008. – 760 с.
12. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. - М.: Колос, 2000.
13. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии - Л.: Химия, 1987
14. Государственная Фармакопея Республики Казахстан. – том 1 – Алматы. – Издательский дом: «Жибек жолы».– 2008. – 592 с.
15. Государственная Фармакопея Республики Казахстан. – том 2. – Алматы. – Издательский дом: «Жибек жолы». – 2009. – 792 с.
16. Сағындыкова Б.А. Дәрілердің өндірістік технологиясы. – Алматы. – 2011. – 346 б.
17. Ақбердиев Ә.С. Тамақ өндірісінің процестері және аппараттары, Алматы; 1998 ж.

## Контроль (вопросы, тесты, задачи и пр.)

### 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?



|                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                                                                                                                    |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                                                                                                                    |

4. Как определить скорость осаждения для несферических частиц?
5. Как определить диаметр частиц, если известна их скорость осаждения?
6. Как влияет несферичность осаждающихся частиц на зависимость  $Ly = f(Ar)$ ?
7. С помощью какой графической зависимости можно вести приближенные расчеты  $w_{oc}$  или  $d_T$  для любого режима осаждения?
8. Как можно учесть стесненность движения при расчете  $w_{oc}$ ?
9. Как рассчитать площадь осаждения в отстойниках?

### Тесты

1. Осаждение частиц, сопровождающееся трением между частицами и их взаимными столкновениями, называется:

☒ стесненное  
☐ свободное  
☐ солидарное  
☐ консолидарное  
☐ коллективное

2. Укажите производительность отстойника.

☐  $V_{ocv} = w_{ct} \tau$   
☐  $V_{ocv} = w_{ct} F \tau$   
☒  $V_{ocv} = w_{ct} F$   
☐  $V_{ocv} = w_{ct} F \tau / h$   
☐  $V_{ocv} = F h / w_{ct}$

3. Укажите поверхность осаждения.

☐  $F = V_{ocv} \tau$   
☒  $F = V_{ocv} / w_{ct}$   
☐  $F = V_{ocv} F \tau$   
☐  $F = V_{ocv} h / (w_{ct} \tau)$   
☐  $F = V_{ocv} h$

4. Выберите уравнение скорости свободного осаждения.

☐  $w = P / \mu (R_{oc} + R_{фп})$   
☐  $w = dV / S d \tau$   
☐  $w = 2 \pi n r / 60$   
☐  $w = \pi d n$   
☒  $w = d^2 g (\rho_{\tau} - \rho) / 18 \mu$

5. Выберите поверхность осаждения в отстойниках.

☐  $F = Q/K \Delta t_{пол}$   
☐  $F = Q/K \Delta t_{cp}$   
☒  $F = V_{ocv} / w_{ct}$   
☐  $F = M/K_Y \Delta Y_{cp}$   
☐  $F = G / \rho w$

6. Осаждение под действием силы тяжести осуществляется при условии соотношении силы тяжести  $G$  и силы сопротивления среды  $R$ ....

☐  $G = R$   
☐  $G < R$   
☒  $G > R$   
☐  $3G = R$   
☐  $G \leq R$

7. Рассмотрим осаждение частиц в жидкости под действием сил тяжести. Укажите силу сопротивления среды

☐  $\pi d^3$   
☐  $G = \frac{\pi}{6} g (\rho_{\tau} - \rho_{ж})$   
☒  $w_{oc} = \sqrt{\frac{4gd (\rho_{\tau} - \rho_{ж})}{3\zeta\rho}}$

$$| \Delta P_n = \left( \lambda \frac{l}{\pi d^2} + \sum \zeta_{m.c.} \right) \frac{\rho \omega^2}{2g}$$

$$| R = \zeta \frac{l}{4} \cdot \frac{\rho \omega^2}{2g}$$

$$| h_n = \left( \lambda \frac{l}{\pi d^2} + \sum \zeta_{m.c.} \right) \frac{\rho \omega^2}{2g}$$

8. Рассмотрим осаждение частиц в жидкости под действием сил тяжести. Укажите силу, осаждающую шарообразную частицу.

$$| R = \zeta \frac{l}{4} \cdot \frac{\rho \omega^2}{2g}$$

$$| \omega_{oc} = \sqrt{\frac{4gd(\rho_T - \rho_{ж})}{3\zeta\rho}}$$

$$| G = \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_T - \rho_{ж})$$

$$| \Delta P_n = \left( \lambda \frac{l}{\pi d^2} + \sum \zeta_{m.c.} \right) \frac{\rho \omega^2}{2g}$$

$$| P_n = \left( \lambda \frac{l}{\pi d^2} + \sum \zeta_{m.c.} \right) \frac{\rho \omega^2}{2g}$$

$$| h_n = \left( \lambda \frac{l}{\pi d^2} + \sum \zeta_{m.c.} \right) \frac{\rho \omega^2}{2g}$$

9. Рассмотрим осаждение частиц в жидкости под действием сил тяжести. Укажите скорость осаждения частиц.

$$| G = \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_T - \rho_{ж})$$

$$| R = \zeta \frac{l}{4} \cdot \frac{\rho \omega^2}{2g}$$

$$| P_n = \left( \lambda \frac{l}{\pi d^2} + \sum \zeta_{m.c.} \right) \frac{\rho \omega^2}{2g}$$

$$| h_n = \left( \lambda \frac{l}{\pi d^2} + \sum \zeta_{m.c.} \right) \frac{\rho \omega^2}{2g}$$

$$| \omega_{oc} = \sqrt{\frac{4gd(\rho_T - \rho_{ж})}{3\zeta\rho}}$$

10. Определить объемную часовую производительность отстойника площадью  $F = 1,5 \text{ м}^2$ , если скорость осаждения взвешенных частиц  $\omega_o = 0,002 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

$$| V_{ocв} = 3,0 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}$$

$$| V_{ocв} = 6,0 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}$$

$$| V_{ocв} = 8,6 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}$$



|                                                                                                       |                                                                                   |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                   |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                   |                                                                                                  |

$$V_{осв} = 10,8 \frac{м^3}{час}$$

$$V_{осв} = 12,5 \frac{м^3}{час}$$

## Тема 9: Центрифуга

**Цель:** Изучение принципа работы и конструкции центрифуги

**Задачи обучения:**

**Студент должен знать:**

- Методы центрифугирования.
- Центробежную силу и фактор разделения.
- Устройства центрифуг.

**Студент должен уметь:**

- определять центробежную силу;
- определять силы тяжести;
- определять окружную скорость ротора;
- определять фактор разделения.

**Основные вопросы темы:**

6. Разделение неоднородных жидких систем в поле центробежных сил.
7. Устройства и принцип действия лабораторной центрифуги.
8. Исследование влияния режимных параметров на степень разделения суспензии.

**Методы обучения и преподавания:**

Студенты должны разобраться в теоретических основах разделения суспензии. На лабораторной установке:

5. Изучить устройства и принцип действия лабораторной центрифуги.
6. Провести эксперименты по разделению суспензии в лабораторной центрифуге.
7. Определить объем влажного осадка и рассчитать фактор разделения.
8. Определить степень уплотнения осадка.
9. Построить зависимость изменения объема влажного осадка от времени центрифугирования  $V_{ос} = f(t)$  при различных числах оборота ротора.
10. Построить зависимость степени уплотнения осадка от фактора разделения  $\Delta = f(Kp)$ .

**Теоретические сведения.**

Механическое обезвоживание неоднородных систем (эмульсий и суспензий) проводят на вакуум-фильтрах (баранных, дисковых, ленточных), листовых фильтрах, фильтр-прессах, центрифугах и виброфильтрах.

Под центрифугированием понимают процесс разделения неоднородных систем в поле центробежных сил с использованием сплошных или проницаемых для жидкости перегородок. Процессы центрифугирования проводятся в машинах, называемых центрифугами.

Центрифуга представляет собой в простейшем виде вертикальный цилиндрический ротор со сплошными или перфорированными боковыми стенками. Ротор укрепляется на вертикальном валу, который приводится во вращение электродвигателем, и помещается в соосный цилиндрический неподвижный кожух, закрываемый съемной крышкой; на внутренней поверхности ротора с перфорированными стенками находится фильтровальная ткань или тонкая металлическая сетка.

Под действием центробежных сил суспензия разделяется на осадок и жидкую фазу, называемую фугатом. Осадок остается в роторе, а жидкая фаза удаляется из него.

В отстойных центрифугах со сплошными стенками производят разделение эмульсий и суспензий по принципу отстаивания, причем действие силы тяжести заменяется действием центробежной силы.

В фильтрующих центрифугах с проницаемыми стенками осуществляют процесс разделения суспензий по принципу фильтрования, причем вместо разности давлений используется действие центробежной силы.

|                                                                                                       |                                                                                   |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                   |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                   |                                                                                                  |

В отстойной центрифуге разделяемая суспензия или эмульсия отбрасывается центробежной силой к стенкам ротора, причем жидкая или твердая фаза с большей плотностью располагается ближе к стенкам ротора, а другая фаза с меньшей плотностью размещается ближе к его оси; осадок (или фаза с большей плотностью) образует слой у стенок ротора, а фугат переливается через верхний край ротора.

В фильтрующей центрифуге разделяемая суспензия также отбрасывается к стенкам ротора и фазы разделяются; при этом жидкая фаза проходит сквозь фильтровальную перегородку в кожух и отводится из него, твердая фаза в виде осадка задерживается на внутренней стороне этой перегородки, а затем удаляется из ротора.

Таким образом, общие закономерности центрифугирования имеют сходство с закономерностями отстаивания и фильтрования. Однако процессы в отстойных и фильтрующих центрифугах сложнее соответствующих процессов в отстойниках и фильтрах. Это обусловлено тем, что в центрифугах вместо силы тяжести и разности давлений действует центробежная сила, достигающая больших значений, а вместо плоских слоев жидкости и осадка образуются слои с цилиндрическими граничными поверхностями, усложняющими зависимость хода процесса от геометрических факторов.

Как известно, в общем случае величина центробежной силы выражается равенством

$$C = \frac{mw^2}{r} = \frac{Gw^2}{gr} \quad (1)$$

где  $C$  — центробежная сила, м;  $m$  — масса вращающегося тела, кг;  $G$  — вес вращающегося тела;  $w$  — окружная скорость вращения, м/сек;  $r$  — радиус вращения, м.  
Окружная скорость определяется:

$$w = \omega r = \frac{2\pi n}{60} r \quad (2)$$

где  $\omega$  — угловая скорость вращения, рад/сек;  $n$  — число оборотов в минуту.

Сопоставляя равенства (1), (2), найдем:

$$C = \frac{G}{rg} \left( \frac{2\pi n}{60} r \right)^2 \quad (3)$$

$$\text{или} \quad C \approx \frac{G}{900} \quad (4)$$

Из выражения (20) следует, что увеличение числа оборотов ротора значительно больше влияет на возрастание центробежной силы, чем увеличение диаметра ротора центрифуги.

Из равенства (17) видно, что ускорение в поле центробежных сил составляет  $w^2 / r$ . Отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести  $g$  называют фактором разделения

$$K_p = \frac{w^2}{gr} \quad (5)$$

Приняв величину  $G = In$ , из соотношений (2, 3, 4) получим:

$$K_p = \frac{In^2}{900} \quad (6)$$

Скорость осаждения частицы в центрифуге определяется из равенства силы сопротивления и центробежной силы.

В области закона Стокса для самых мелких частиц при  $Re < 2$  скорость осаждения:

$$W_{oc} = W_0 \cdot K_p \quad (7)$$

где  $W_0$  — скорость осаждения данной частицы под действием силы тяжести.

В переходной области ( $Re = 2 \div 500$ ):

$$W_{oc} = W_0 \cdot K_p \cdot 0,715 \quad (8)$$

В автомодельной области ( $Re > 500$ )

$$W_{oc} = W_0 \cdot K_p \cdot 0,5 \quad (9)$$

Так как требуемая поверхность осаждения обратно пропорциональна скорости осаждения, то поверхность осаждения в центрифуге меньше поверхности отстойника при равной производительности в области закона Стокса в  $K_p$  раз, в переходной области в  $K_p \cdot 0,715$  раз и в автономной области в  $K_p \cdot 0,5$  раз.



|                                                                                                                                                      |  |                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p style="text-align: center;"> ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/> «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ </p> |  | <p style="text-align: center;"> <br/> SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/> АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» </p> |
| <p style="text-align: center;">Кафедра инженерных дисциплин</p>                                                                                      |  | <p style="text-align: center;">Сәйкес<br/>номері 44<br/>беттің 56 беті</p>                                                                                                                                                            |
| <p style="text-align: center;">Методические указания для лабораторных занятий</p>                                                                    |  |                                                                                                                                                                                                                                       |

По значению фактора разделения центрифуги можно условно разделить на две группы: нормальные центрифуги ( $K_r < 3500$ ) и сверхцентрифуги ( $K_r > 3500$ ).

Нормальные центрифуги применяются главным образом для разделения различных суспензий, за исключением суспензий с очень малой концентрацией твердой фазы, а также для удаления влаги из штучных материалов. Сверхцентрифуги служат для разделения эмульсий и тонкодисперсных суспензий.

Нормальные центрифуги могут быть отстойными и фильтрующими. Сверх центрифуги являются аппаратами отстойного типа и подразделяются на трубчатые сверхцентрифуги, используемые для тонкодисперсных суспензий, и жидкостные сепараторы, служащие для разделения эмульсий.

Существенным признаком типа центрифуг является способ выгрузки из них осадка. Выгрузка производится вручную, при помощи ножей или скребков, шнеков и поршней, движущихся возвратно-поступательно (пульсирующих), а также под действием силы тяжести и центробежной силы.

По расположению оси вращения различают вертикальные, наклонные и горизонтальные центрифуги. Вал ротора вертикальной центрифуги имеет опору внизу или подвешивается сверху.

В зависимости от организации процесса центрифуги делятся на периодически и непрерывно действующие.

#### Описание экспериментальной установки

Установка (рис.1) состоит из ротора (1), электродвигателя (2), рабочих кювет (3), пробирок с исследуемой системой (4) и пульта управления (5).

На пульте управления смонтирован часовой механизм для автоматического выключения привода центрифуги, тахометр для контроля числа оборотов ротора, пакетный переключатель числа оборотов ротора и кнопка электромагнитного тормоза.

Центрифуга лабораторная медицинская СМ-6МТ является переносной с частотой вращения 3500 об/мин, предназначенной для разделения неоднородных жидких систем плотностью до 2 г/см<sup>3</sup> в поле центробежных сил. Она предназначена для исследований в области медицины и других областях.

Частота вращения ротора центрифуги регулируется ступенчато в диапазоне от 100 до 3500 об/мин через каждые 100 об/мин.

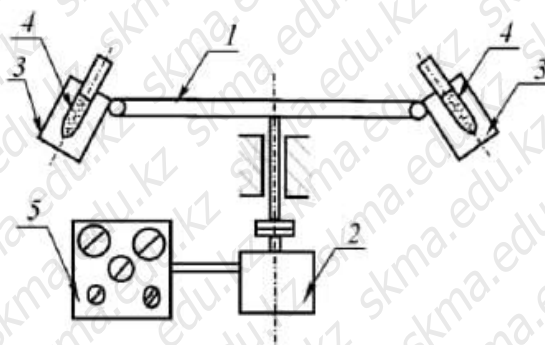


Рисунок 1. Схема лабораторной установки.

1 – ротор; 2 – электродвигатель; 3 – рабочие кюветы; 4 – пробирки; 5 – пульт управления

#### Подготовка центрифуги к работе

1. Подключить сетевой шнур центрифуги к сети переменного тока.
2. Закройте крышку центрифуги.
3. Установить кнопкой задатчика механизма отсчета времени (в дальнейшем – часы) требуемое время центрифугирования.
4. Установить задатчиком частоты вращения ротора требуемое число оборотов.
5. Нажмите на кнопку «Старт». Ротор начнет вращаться и автоматически достигнет заданной частоты вращения.
6. После истечения заданного времени автоматически отключается напряжение питания электродвигателя, и ротор начнет останавливаться.
7. Выключатель цепи питания установить в положение отключено.
8. После полной остановки ротора откроется крышка центрифуги, снять крышку ротора и вынуть пробирки.
9. Для продолжения центрифугирования взболтнуть центрифугат в пробирках и повторить процесс.

#### Порядок проведения работы

|                                                                                                                                                      |  |                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p style="text-align: center;"> ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/> «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ </p> |  | <p style="text-align: center;"> <br/> SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/> АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» </p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                                                         |  |                                                                                                                                                                                                                                        |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                                                                       |  |                                                                                                                                                                                                                                        |

1. В две пробирки наливаются по 10 мл исследуемой суспензии.
2. Пробирки устанавливаются в центрифугу симметрично относительно оси вращения в стаканчики ротора центрифуги.
3. Включите центрифугу кнопкой «СЕТЬ».
4. Закройте крышку центрифуги.
5. Установите на центрифуге при помощи соответствующих кнопок частоту вращения (варианты - 300, 700, 1000, 1300, 1700 об/мин. и время (от 0 до 10 мин через 1 мин).
6. Выключение происходит через заданный интервал автоматическом режиме.
7. Измерьте радиус центрифугирования  $r$ , это расстояние от центра центрифуги до слоя осадка.
8. Извлеките любую пробирку из центрифуги и при помощи линейки измерьте высоту фугата, после чего зажав пальцем интенсивно встряхните и поместите обратно. Результаты измерений занесите в табл.1. Возможно повторение процесса со следующей пробиркой и т.д.
9. Опыт повторяют на различной частоте и продолжительности процесса.
10. Определите объем влажного осадка по формуле  

$$V_{oc} = V_c - V_{ф}$$
где  $V_c$  – объем суспензии, мм<sup>3</sup>;  $V_{ф}$  – объем фугата, мм<sup>3</sup>.  

$$V_{ф} = h(\pi d^2/4)$$
где  $h$  – высота слоя фугата, мм;  $d$  – диаметр пробирки, мм.
10. Рассчитайте фактор разделения по формуле (6).
11. Определите степень уплотнения осадка:  

$$\Delta = V_{oc} / V_{oc}$$
где  $V_{oc}$  – первоначальный объем осадка, мм<sup>3</sup>;  $V_{oc}$  – объем осадка в данный момент времени, мм<sup>3</sup>.
12. Постройте зависимость изменения объема влажного осадка от времени центрифугирования  $V_{oc} = f(t)$  при различных числах оборота ротора.
13. Постройте зависимость степени уплотнения осадка от фактора разделения  $\Delta = f(K_p)$ .
14. Составьте отчет и сделайте выводы по работе.

Таблица 1. Результаты замера и расчета при разделении суспензии в поле центробежных сил

| № пробирки | Число оборотов, об/мин | Время центрифугирования $t$ , мин | Радиус центрифугирования $r$ , м | Высота слоя фугата $h$ , мм | Объемы                            |                                  |                                   | Фактор разделения $K_p$ |
|------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
|            |                        |                                   |                                  |                             | Суспензии $V_c$ , мм <sup>3</sup> | Фугата $V_{ф}$ , мм <sup>3</sup> | осадка $V_{oc}$ , мм <sup>3</sup> |                         |
|            |                        |                                   |                                  |                             |                                   |                                  |                                   |                         |
|            |                        |                                   |                                  |                             |                                   |                                  |                                   |                         |
|            |                        |                                   |                                  |                             |                                   |                                  |                                   |                         |
|            |                        |                                   |                                  |                             |                                   |                                  |                                   |                         |

## 5. Литература:

### Основная:

1. В.И. Чуешов, Е.В. Гладох, И.В. Сайко. Технология лекарств промышленного производства. Ч. 1. – Винница: Нова книга, 2014. -696 с.
2. В.И. Чуешов, Е.В. Гладох, И.В. Сайко. Технология лекарств промышленного производства. Ч. 2. –Винница: Нова книга, 2014. -664 с.
3. Промышленная технология лекарств, Том 1. Под ред. Чуешова В.И. – Х.: МТК-Книга, Издательства НФАУ, 2002 – 560 с.
4. Промышленная технология лекарств, Том 2. Под ред. Чуешова В.И. – Х.: МТК-Книга, Издательства НФАУ, 2002 – 557 с.
5. Мانتлер С. Н. Процессы и аппараты химической технологии : учебное пособие / С. Н. Мانتлер, Г. М. Жуманазарова. - Министерство образования и науки Республики Казахстан. - Алматы : "Бастау", 2018. - 256 с
6. Дытнерский Ю.И Процессы и аппараты химической технологии: В двух томах / Ю.И Дытнерский. — М.: Альянс, 2015. — 368 с.
7. Дытнерский, Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию: Учебное пособие для вузов / Ю.И. Дытнерский, Г.С. Борисов, В.Брыков. - М.: Альянс, 2015. - 496 с.
8. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов / А.Г. Касаткин. - М.: Альянс, 2014. - 752 с.



9. Остриков А.Н. Процессы и аппараты. Расчет и проектирование аппаратов для тепловых и тепломассообменных

|                                                                                                       |                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                                                                                                                   |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                                                                                                                   |

процессов: Учебное пособие / А.Н. Остриков, В.Н. Василенко и др. - СПб.: Лань, 2018. - 440 с.

- Алексеев, Г.В. Виртуальный лабораторный практикум по курсу «Процессы и аппараты пищевых производств»: Уч. Пособие / Г.В. Алексеев, И.И.

#### дополнительная:

- Плаксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. – М.: КолосС, 2008. – 760 с.
- Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. - М.: Колос, 2000.
- Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии - Л.: Химия, 1987
- Государственная Фармакопея Республики Казахстан. – том 1 – Алматы. – Издательский дом: «Жибек жолы».– 2008. – 592 с.
- Государственная Фармакопея Республики Казахстан.– том 2. – Алматы.– Издательский дом: «Жибек жолы».– 2009. – 792 с.
- Сағындыкова Б.А. Дәрілердің өндірістік технологиясы.– Алматы.–2011.– 346 б.
- Акбердиев Ә.С. Тамақ өндірісінің процестері және аппараттары, Алматы; 1998 ж.

## Контроль (вопросы, тесты, задачи и пр.)

### Контрольные вопросы

- Типы и конструкции осадительных центрифуг?
- Параметры, характеризующие работу центрифуг?
- Что такое фактор разделения?
- Из каких основных элементов состоит лабораторная центрифуга?

### Тесты

- Центрифугирование – это процесс разделения неоднородных систем под действием...

☐ центробежных сил  
☐ сил тяжести  
☐ разности давлений  
☐ сил инерции  
☐ электростатических сил

- Под действием разности давлений при фильтровании суспензия разделяется на:

☐ кубовый остаток и дистиллят  
☐ осадок и фугат  
☐ осадок и фильтрат  
☐ влагу и сухой продукт  
☐ экстракт и рафинат

- Выберите уравнение скорости центрифугирования.

☐  $w = dV/Sd$   
☐  $w = dn$   
☒  $w = 2 \pi r / 60$   
☐  $w = d^2 g ( \tau - ) / 18$   
☐  $w = \Delta P / (R_{oc} + R_{фп})$

- Нормальные центрифуги имеют фактор разделения.

☒ меньше 3500  
☐ больше 3500  
☐ равным 3500  
☐ больше 10000  
☐ меньше 2300

- Сверхцентрифуги имеют фактор разделения.

☐ равным 3500  
☐ меньше 3500  
☒ больше 3500  
☐ больше 10000  
☐ меньше 2300

- Для разделения неоднородных смесей применяется следующее оборудование.

☒ Сушилка.



|                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                                                                                                                    |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                                                                                                                    |

Ректификационная колонна.

Дробилка.

Насос.

**Отстойная центрифуга.**

7. Разделение смеси в центрифугах, сепараторах и гидроциклонах происходит под действием....

силы тяжести.

**центробежной силы.**

перепада температур.

перепада давления.

разности концентрации.

8. Аппараты, которые представляют собой несколько отстойников, поставленных один на другой, или цилиндрический резервуар с коническим днищем, внутри которого имеются конические перегородки, называются....

отстойные центрифуги.

отстойники с гребковой мешалкой.

**многоярусные отстойники.**

батарейные циклоны.

многоступенчатые насосы.

9. Движущей силой в фильтрующих центрифугах является....

разность концентрации

гравитация

перепад давления

перепад температуры

**центробежная сила**

10. Расчет фильтрующих центрифуг периодического и непрерывного действия заключается в определении ....

**площади фильтрования**

частоты вращения

высоты центрифуги

плотности суспензии

плотности фугата

**Тема 10: Исследование процесса перемешивания**

**Цель:** Ознакомление с устройством и работой аппарата с мешалкой.

**Задачи обучения:**

**Студент должен знать:**

- способы перемешивания жидких сред;
- критериальное уравнение для расчета потребляемой мощности;
- факторы, влияющие на потребляемую мешалкой мощность.

**Студент должен уметь:**

- Составлять критериальное уравнение, описывающее работу мешалки.
- Произвести расчет мощности аппарата с мешалкой.

**Основные вопросы темы:**

- конструктивные элементы аппарата с мешалкой
- обобщенное критериальное уравнение, описывающее работу одного типа мешалки.
- расчет мощности аппарата с мешалкой

**Методы обучения и преподавания:**

**Задание.**

Студенты должны разобраться в физических основах перемешивания и конструкции аппарата с мешалкой. На виртуальной лабораторной установке:

1. Пройти тестирование по основным характеристикам аппарата с мешалкой.

|                                                                                                       |                                                                                  |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                  |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                  |                                                                                                  |

2. Изучить основные конструктивные элементы аппарата с мешалкой и измерительную схему.
3. Получить обобщенное критериальное уравнение, описывающее работу одного типа мешалки.
4. Провести расчет мощности по полученному критериальному уравнению и сравнить их с измеренными.

#### Теоретические сведения.

Перемешивание – это процесс многократного перемещения макрообъемов текучей среды друг относительно друга во всем объеме аппарата, протекающей за счет импульса, передаваемого среде механической мешалкой, струей жидкости или газа.

Процесс перемешивания широко используется в фармацевтической промышленности при приготовлении суспензий, эмульсий, для интенсификации процессов нагрева и охлаждения обрабатываемых систем, а также для интенсификации процессов массообмена в перемешиваемой среде.

Наибольшее распространение в настоящее время получили механические мешалки различных типов (лопастные, пропеллерные, турбинные, якорные, шнековые). При перемешивании такими мешалками возникает сложное трехмерное движение перемешиваемой среды. Основным является тангенциальное движение, которое возникает в объеме аппарата радиальные и аксиальные потоки. Сложный характер движения среды в аппарате не позволяет получить аналитического описания процесса, поэтому для описания процесса при установившемся режиме пользуются различными критериальными уравнениями, полученными методами теории подобия.

Важной характеристикой работы любой механической мешалки является расход энергии на вращение рабочего элемента мешалки при известных ее размерах и заданных физических свойствах среды. Мощность, потребляемая мешалками, зависит от многих факторов. Методы и расчетные формулы, принятые в настоящее время для определения мощности, еще не могут считаться достаточно полными. Это обстоятельство обуславливает необходимость проведения экспериментальных исследований, на основе которых затем получают необходимые критериальные уравнения.

Процесс перемешивания с гидродинамической точки зрения может быть рассмотрен как процесс внешнего обтекания тела потоком вязкой жидкости, следовательно, можно получить общее критериальное уравнение, описывающее этот процесс:

$$Eu_M = f(Re_M, Fr_M, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_i), \quad (8.1)$$

где  $Eu_M = \frac{N}{\rho n^3 d^5}$  – критерий Эйлера для перемешивания (определяемый критерий);

$Re_M = \frac{\rho n d^2}{\mu}$  – критерий Рейнольдса для перемешивания (определяющий критерий);

$Fr_M = \frac{n^2 d}{g}$  – центробежный критерий Фруда (определяющий критерий);

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

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости среды, Па·с;

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

$d$  – диаметр рабочего элемента мешалки, м;

$n$  – частота вращения мешалки, об/с;

$N$  – мощность, потребляемая мешалкой при установившемся режиме, Вт;

$\Gamma_1 = \frac{H}{d}$  – симплекс геометрического подобия;

$H$  – уровень среды в аппарате, м;

$\Gamma_2 = \frac{D}{d}$  – симплекс геометрического подобия;

$D$  – диаметр аппарата, м.

Таким образом, обобщенная зависимость для определения мощности на валу мешалки при условии геометрического подобия будет иметь вид:

$$Eu_M = c Re_M^k Fr_M^m \quad (8.2)$$

где  $c, k, m$  – экспериментально определяемые величины.

В случаях, когда на поверхности среды не образуется воронка, например, при установке отражательных перегородок или при погружении рабочего элемента мешалки на достаточную глубину, влиянием силы тяжести можно пренебречь и из уравнения (8.2) исключить критерий Фруда. Тогда обобщенное уравнение для определения мощности, потребляемой мешалкой, примет вид:



|                                                                                                              |                                                                                  |                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/><b>MEDISINA<br/>AKADEMIASY</b><br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/><b>MEDICAL<br/>ACADEMY</b><br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| <p>Кафедра инженерных дисциплин<br/>Методические указания для лабораторных занятий</p>                       |                                                                                  |                                                                                                         |

$$Eu_M = c Re_M^k \quad (8.3)$$

откуда:

$$N = (\rho n^3 d^5) c Re_M^k \quad (8.4)$$

### Цель работы

1. Изучить основные конструктивные элементы аппарата с мешалкой и измерительную схему.
2. Получить обобщенное критериальное уравнение, описывающее работу одного типа мешалки.
3. Провести расчеты мощности по полученному критериальному уравнению и сравнить их с измеренными.

### Описание экспериментальной установки

Схема установки для исследования процесса перемешивания приведена на рисунке 1.

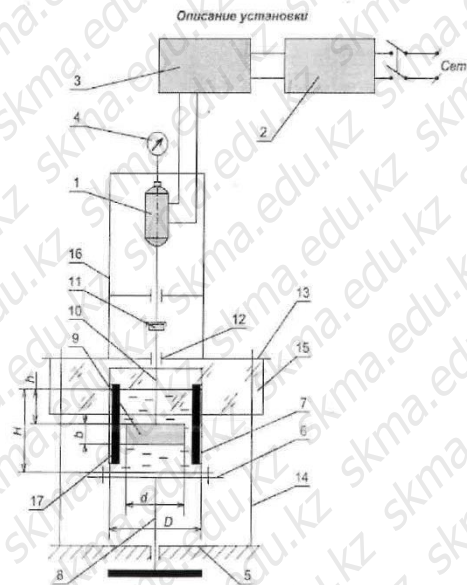


Рисунок 8.1 Схема установки для исследования процесса перемешивания

Мешалка приводится в действие электродвигателем 1, изменение частоты вращения которого осуществляется путем изменения напряжения питания с помощью линейного автотрансформатора 2 (ЛАТР). Мощность, потребляемая электродвигателем, измеряется с помощью ваттметра 3.

Измеряют частоту вращения вала мешалки с помощью тахометра 4. При измерениях тахометр устанавливается на торец вала электродвигателя и удерживается рукой. К тахометру не следует прикладывать осевого усилия, так как в противном случае это может привести к искажению результатов измерения.

На станине 5 установлен подъемный стол 6, на котором закрепляется корпус мешалки 7. С помощью винта 8 корпус мешалки может быть установлен на различном уровне по высоте относительно рабочего элемента. Уровень жидкости в корпусе мешалки  $H$ , а также расстояние от нижней кромки лопасти до дна корпуса определяют по шкале, нанесенной на боковой поверхности корпуса. Сменные рабочие элементы мешалки 9 крепятся к валу 10, который через муфту 11 соединен с электродвигателем 1.

Вал 10 вращается в подшипниках 12, установленных в плите 13, которая стойками 14 соединена со станиной. К плите 13 крепится защитный экран 15, а также кожух 16 с электродвигателем. Внутри корпуса мешалки 7 установлены четыре отражательные перегородки 17.

### Методика выполнения работы

1. Перед пуском установки следует ознакомиться с содержанием работы и устройством установки.
2. Сначала необходимо включить и подготовить к работе систему измерения мощности (включить питание).
3. Регулятор напряжения питания электродвигателя установить на ноль.
4. В соответствии с заданием заполнить таблицу исходных данных (таблица 8.1). Необходимые геометрические размеры измерять штангенциркулем.
5. В соответствии с заданием закрепить рабочий элемент мешалки заданного типа и размера на валу, установить корпус мешалки указанного типа на подъемном столе. Включить питание электродвигателя.

|                                                                                                       |  |                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  |  <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |  |                                                                                                                                                                                    |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |  |                                                                                                                                                                                    |

Таблица 8.1

| Размеры образца                         | Обозначение | Единица измерения  | Значения |
|-----------------------------------------|-------------|--------------------|----------|
| Диаметр мешалки                         | $d$         | м                  |          |
| Диаметр корпуса мешалки                 | $D$         | м                  |          |
| Высота слоя среды                       | $H$         | м                  |          |
| Ширина лопасти                          | $b$         | м                  |          |
| Перегородки корпуса                     | $z$         | шт                 |          |
| Глубина погружения рабочего элемента    | $h$         | м                  |          |
| Температура среды                       | $t$         | $^{\circ}\text{C}$ |          |
| Плотность среды                         | $\rho$      | $\text{кг/м}^3$    |          |
| Коэффициент динамической вязкости среды | $\mu$       | $\text{Нс/м}^2$    |          |

Тип мешалки \_\_\_\_\_

Исследуемая среда \_\_\_\_\_

Таблица 8.2

| № опыта | Мощность, Вт | Частота вращения, об/мин |          |          | Среднее значение $n$ , об/мин | Рандомизация    |                           |
|---------|--------------|--------------------------|----------|----------|-------------------------------|-----------------|---------------------------|
|         |              |                          |          |          |                               | случайное число | последовательность замера |
| 1       | $N_1$        | $n_{11}$                 | $n_{12}$ | $n_{13}$ | $n_1$                         |                 |                           |
| 2       | $N_2$        | $n_{21}$                 | $n_{22}$ | $n_{23}$ | $n_2$                         |                 |                           |
| 3       | $N_3$        | ...                      | ...      | ...      | ...                           |                 |                           |
| 4       | $N_4$        | ...                      | ...      | ...      | ...                           |                 |                           |
| 5       | $N_5$        | ...                      | ...      | ...      | ...                           |                 |                           |
| 6       | $N_6$        | ...                      | ...      | ...      | ...                           |                 |                           |
| 7       | $N_7$        | ...                      | ...      | ...      | ...                           |                 |                           |
| 8       | $N_8$        | $n_{81}$                 | $n_{82}$ | $n_{83}$ | $n_8$                         |                 |                           |

6. Провести рандомизацию опытов (см. табл. 8.2). Для компенсации в известной степени систематической погрешности, а также для того, чтобы избежать некоторой неслучайной связи между результатами замеров в опытах, используется прием, называемой рандомизацией. Он заключается в том, что опыты проводятся в случайной последовательности, которая устанавливается с помощью таблицы случайных чисел. Для рандомизации из таблицы случайных чисел выбирается из любого столбца или строки последовательность случайных чисел и записывается в соответствующей столбец таблицы 8.2. Замеры проводятся в порядке возрастания или убывания случайных чисел.

7. Произвести замеры потребляемой мощности на холостом ходу при заданных частотах вращения мешалки и заполнить таблицу 8.2. Измерения проводить не менее трех раз, каждый раз последовательно изменяя частоту вращения.

8. Залить в корпус мешалки заданный объем исследуемой системы и замерить ее температуру. С помощью ходового винта установить заданную глубину погружения рабочего элемента мешалки в жидкость.

9. В условиях установившегося режима работы мешалки провести замеры частоты вращения мешалки при заданных значениях мощности. Для получения надежных результатов провести не менее трех измерений, каждый раз последовательно изменяя частоту вращения. Результаты измерений занести в таблицу 8.2.

10. После окончания измерений вывести регулятор напряжения на ноль и выключить питание электродвигателя, выключить систему измерения мощности мешалки, опустить подъемный стол, снять корпус мешалки, слить исследуемую жидкость в сборник и промыть корпус, снять мешалку.

#### Обработка опытных данных и составление отчета



|                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                                                                                                                    |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                                                                                                                    |

1. Прежде чем перейти к обработке экспериментальных данных, необходимо убедиться, что результаты измерений воспроизводимы, т.е. установить, не было ли на них влияния неучтенных величин. С этой целью следует обработать данные параллельных опытов по измерению частоты вращения на основе экспериментально-статистических методов исследования. Для этого необходимо записать измерения частоты вращения в таблицу 8.3.

Таким образом, проведено  $e$  серий параллельных опытов ( $e = 8$ ), включающих  $U$  измерений частоты вращения ( $U = 3$ ).

Таблица 8.3

| № опыта | Частота вращения, об/мин |          |          | Среднее значение $n$ , об/мин | Дисперсия, $S_j^2$ |
|---------|--------------------------|----------|----------|-------------------------------|--------------------|
|         | 1                        | 2        | 3        |                               |                    |
| 1       | $n_{11}$                 | $n_{12}$ | $n_{13}$ | $n_1$                         | $S_1^2$            |
| 2       | $n_{21}$                 | $n_{22}$ | $n_{23}$ | $n_2$                         | $S_2^2$            |
| ...     | ...                      | ...      | ...      | ...                           | ...                |
| $j$     | ...                      | ...      | ...      | ...                           | $S_j^2$            |
| ...     | ...                      | ...      | ...      | ...                           | ...                |
| 8       | $n_{81}$                 | $n_{82}$ | $n_{83}$ | $n_8$                         | $S_8^2$            |

Для каждой серии параллельных опытов вычислить среднее арифметическое значение измеренной частоты вращения:

$$\bar{n}_j = \frac{1}{U} \cdot \sum_{i=1}^U n_{ji} \quad (j = 1, 2, \dots, e; i = 1, \dots, U)$$

Для каждой серии затем вычислить оценку дисперсии:

$$S_j^2 = \frac{1}{(U-1)} \cdot \sum_{i=1}^U (n_{ji} - \bar{n}_j)^2$$

Для проверки воспроизводимости опытов найти критерий Кохрена, как отношение наибольшей из оценок дисперсий к сумме всех оценок дисперсий:

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{i=1}^e S_j^2}$$

Значения критерия Кохрена  $G_T$  приведены в таблице 8.4. Они соответствуют доверительной вероятности ( $P = 0,95$ ), с которой принимается гипотеза о воспроизводимости опытов.

Значение  $G_T$  определить, исходя из числа степени свободы  $f_2 = e$  и  $f_1 = (U - 1)$ , по таблице 8.4.

Если выполняется условие  $G_p < G_T$ , то опыты считаются воспроизводимыми. В этом случае можно рассчитать генеральную дисперсию воспроизводимости:

Таблица 8.4

| Степень свободы $f_2 = e$ | Степень свободы $f_1 = U - 1$ |        |        |        |        |        |
|---------------------------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                           | 1                             | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| 2                         | 0,9985                        | 0,9750 | 0,9392 | 0,9057 | 0,8584 | 0,8534 |
| 3                         | 0,9669                        | 0,8709 | 0,7977 | 0,7457 | 0,7071 | 0,6771 |
| 4                         | 0,9065                        | 0,7679 | 0,6841 | 0,6287 | 0,5895 | 0,5598 |
| 5                         | 0,8412                        | 0,6838 | 0,5981 | 0,5440 | 0,5063 | 0,4783 |

|   |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 6 | 0,7808 | 0,6161 | 0,5321 | 0,4803 | 0,4447 | 0,4184 |
| 7 | 0,7271 | 0,5612 | 0,4800 | 0,4307 | 0,3907 | 0,3726 |
| 8 | 0,6798 | 0,5157 | 0,4377 | 0,3910 | 0,3595 | 0,3362 |
| 9 | 0,6385 | 0,4775 | 0,4027 | 0,3584 | 0,3286 | 0,3067 |

Если опыты невоспроизводимы, то можно попытаться достигнуть воспроизводимости выявлением и устранением источников нестабильности эксперимента, а также использованием более точных методов и средств.

В общем случае рассмотренная методика оценки воспроизводимости опыта имеет универсальный характер и может быть использована при любых экспериментальных исследованиях. При этом минимальные значения величин « $e$ » и « $U$ » берутся от 2 до 4.

2. По данным экспериментов построить график зависимости мощности холостого хода  $N_x$  от частоты вращения мешалки:  $N_x = f(n)$ .

3. Рассчитать полезную мощность, потребляемую мешалкой при перемешивании жидкости по заданной частоте вращения рабочего элемента (табл. 8).  $N_x$  – определить из графика  $N = N_p - N_x$

4. Для каждого опыта рассчитать по формуле (8.3) значения критериев  $Eu_m$  и  $Re_m$ .

5. На основании вычисленных значений  $Eu_m$  и  $Re_m$ , построить график зависимости  $lg Eu_m$  от  $lg Re_m$  и определить значение величин  $C$  и  $K$ , входящих в критериальное уравнение (8.3). Прологарифмировав уравнение (8.3), получить уравнение прямой линии в логарифмических координатах:

$$lg(Eu_m) = K \cdot lg(Re_m) + lg(C)$$

Показатель степени определяется как тангенс угла наклона  $\varphi$  к оси абсцисс (рис. 8.2.). Так как угол находится во второй четверти, то тангенс этого угла – отрицательная величина, а, следовательно, и  $K$  – отрицательная величина.



Рисунок 8.2. Зависимость  $lg(Eu_m) = f(lg Re_m)$ .

Постоянная  $C$  находится как отрезок, отсекаемый прямой на оси координат, или из уравнения (2.3) при известном  $K$ . Если  $C$  определяется с использованием уравнения (2.3), то необходимо рассчитать 3-5 значений  $C$  и найти из них среднее.

### Примечание

При построении графика по рисунку 8.2 необходимо выполнить следующие условия:

- оси координат должны начинаться от нуля;
  - масштабы по осям должны быть одинаковые.
- Данные расчетов внести в отчетную таблицу 8.5.

Таблица 8.5.



|                                                                                             |                                |                                                                                  |                                      |                                                                                        |           |        |           |                   |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|-----------|-------------------|----------|
| ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br>MEDISINA<br>AKADEMIASY<br>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ |                                |  |                                      | SOUTH KAZAKHSTAN<br>MEDICAL<br>ACADEMY<br>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» |           |        |           |                   |          |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                |                                |                                                                                  |                                      |                                                                                        |           |        |           |                   |          |
| Методические указания для лабораторных занятий                                              |                                |                                                                                  |                                      |                                                                                        |           |        |           |                   |          |
| № опыта                                                                                     | Частота вращения<br>$n$ , об/с | Мощность холостого<br>хода $N_x$ , Вт                                            | Потребляемая<br>мощность $N$ ,<br>Вт | $Eu_m$                                                                                 | $Ig Eu_m$ | $Re_m$ | $Ig Re_m$ | $N_{pac}$ ,<br>Вт | $\Delta$ |
| 1                                                                                           |                                |                                                                                  |                                      |                                                                                        |           |        |           |                   |          |
| 2                                                                                           |                                |                                                                                  |                                      |                                                                                        |           |        |           |                   |          |
| 3                                                                                           |                                |                                                                                  |                                      |                                                                                        |           |        |           |                   |          |

- Записать полученное критериальное уравнение, подставив в него экспериментально определенные величины  $C$  и  $K$  (2.3).
- Рассчитать по формуле (2.4) мощность, потребляемую мешалкой при заданной частоте вращения, и сравнить с экспериментально полученными значениями (табл. 8.5).
- Оценить адекватность полученного критериального уравнения.

Рассчитать отношение, которое позволит оценить погрешность полученного критериального уравнения (в процентах):

$$\Delta = \frac{N_{pac} - N}{N_{pac}} 100$$

#### Порядок выполнения виртуальной лабораторной работы

Виртуальная лабораторная работа по воспроизведению процесса перемешивания и определению расхода мощности содержит: сосуд с водой; электродвигатель с мешалкой, укрепленной на валу; линейный автотрансформатор с возможностью регулировать напряжение, подаваемое на электродвигатель; измеритель мощности потребляемого при этом тока и тахометр для измерения числа оборотов вала двигателя.

Сосуд имеет четыре перегородки для локализации возмущений и предотвращения возможности образования воронки. Двигатель и тахометр установлены на штативах и при помощи специальных ручек могут перемещаться по вертикали.

Кроме того, виртуальная работа содержит две измерительные линии по оси  $X$  и по оси  $Y$ . При помощи этих линий можно проводить измерение размеров высоты погружения двигателя с мешалкой в сосуд, размеров сосуда и мешалки. Для перемещения линий достаточно поместить курсор в область красного кружочка и, нажимая при этом левую кнопку мыши, перемещать ее в нужном направлении.

Таким же образом, можно перемещать двигатель по штативу и тахометр.

Начинать выполнение работы следует с наведения курсора на сетевой выключатель «Выкл» ЛАТРа. При этом в центре экрана появится панель с данными, которые необходимо переписать в таблицы 8.1 и 8.2 соответственно.

Не включая двигатель, провести геометрические обмеры сосуда и мешалки и занести данные в таблицу 8.1. После включения ЛАТРа измерение по оси  $X$  будет заблокировано, либо ширину лопасти мешалки при ее вращении без погрешности измерить уже невозможно.

Далее можно включить ЛАТР и при помощи ползунка в нижней его части регулировать подаваемое на двигатель напряжение. Обратите внимание, что ваттметр имеет 150 делений, но измеряемая максимальная мощность при этом составит 75 Вт, следовательно необходимо определить цену деления ваттметра.

Для измерения мощности холостого хода следует переместить двигатель вверх, так, чтобы рабочий элемент мешалки оказался над водой. Измерение частоты вращения провести в нескольких точках диапазона потребления (не менее 8), например, от 5 Вт до 45 Вт с шагом 5 Вт. Результаты измерений занести в таблицу 8.2. Частоту вращения необходимо измерять тахометром. Для чего достаточно поместить курсор в красную область ручки тахометра и нажимая левую кнопку мыши перемещать ее вниз до соприкосновения нижней части оси тахометра с осью двигателя. При этом на табло тахометра будет отражаться число его оборотов.

Последовательность измерений определяется рядом ранее полученных случайных чисел, например по возрастанию их значений, а измерение частоты вращения должно проводиться не менее трех раз и усредняться. Далее по данным таблицы 8.2 можно будет построить график зависимости мощности холостого хода  $N$  от частоты вращения мешалки.

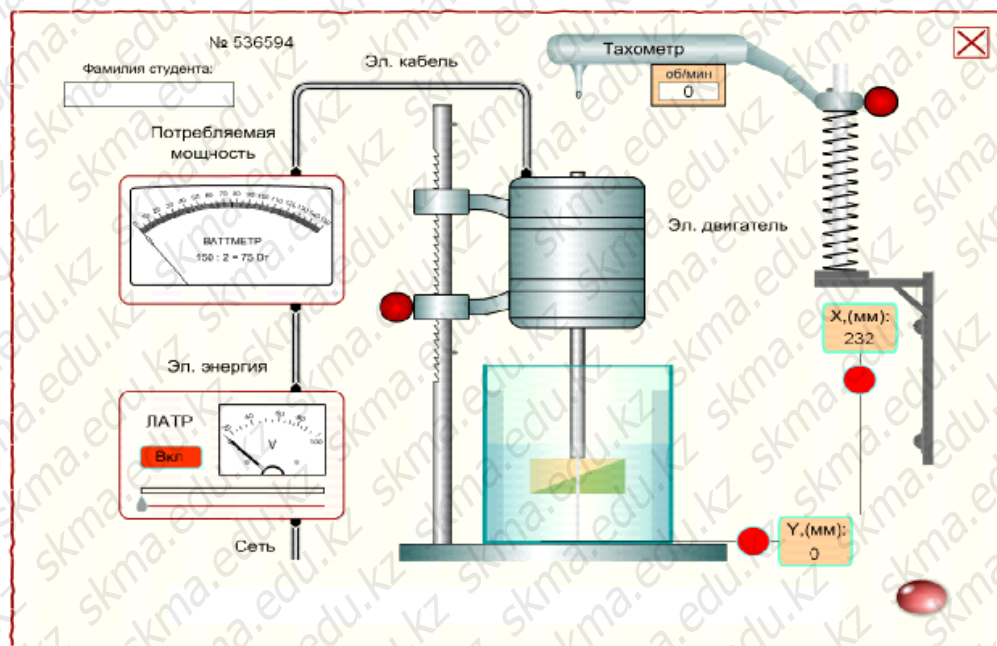
Следующий этап выполнения виртуальной работы – это измерение расхода мощности при перемешивании жидкости. Для проведения эксперимента следует опустить двигатель с мешалкой на заданную преподавателем глубину  $h$ , например, 65 мм.

Далее следует повторить серию измерений, так же как при измерении мощности холостого хода и добавить еще 8 пунктов в таблицу 8.2 в той же последовательности (в соответствии с теми же случайными числами), но другими значениями потребляемой мощности, например, от 25 Вт до 60 Вт с шагом 5 Вт (задает преподаватель).

Заполнив таблицу 8.2, можно переходить к анализу воспроизводимости результатов измерений, для этого необходимо переписать измеренные частоты вращения в таблицу 8.3 и рассчитать генеральную дисперсию воспроизводимости.

|                                                                                                              |                                                                                   |                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/><b>MEDISINA<br/>AKADEMIASY</b><br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/><b>MEDICAL<br/>ACADEMY</b><br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                 |                                                                                   |                                                                                                         |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                               |                                                                                   |                                                                                                         |

Затем следует выполнить расчеты по п. 2–7 раздела 8.5 «Обработка данных и составление отчета» настоящих методических указаний.



## 5 Литература

### Основная:

- 1 Промышленная технология лекарств, Том 1. Под ред. Чуешова В.И. – Х.: МТК-Книга, Издательства НФАУ, 2002 – 560 с.
- 2 Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: ООО ТИД "Альянс", 2004. – 753 с.
- 3 Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. В 2-х кн. / Ю.И.Дытнерский. – М.: Химия, 2002. – 400–368 с
- 4 Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков; под ред. П.Г. Романкова. – 14-е изд., стер. – М.: Альянс, 2007. С. 576
- 5 Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию: Учебное пособие для студ. химико-технологических спец. вузов; Допущено Гос. комитетом СССР / Г. С. Борисов [и др.]; под ред. Ю.И. Дытнерского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Альянс, 2008. – 496 с
- 6 Плаксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. – М.: Колос, 2008. – 760 с.
- 7 Ешова Ж.Т. Химиялық технологияның негізгі процестері мен аппараттары: Оқу құралы. – Алматы Қазақ университеті, 2007. – 237б.
- 8 Ақбердиев Ә.С., Ханқожаев Ш.Х., Омарқұлов П.К. Тамақ өндірісінің процестері және аппараттары, 2-ші бөлім, Шымкент, 2004 ж.
- 9 Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. – М.: Колос, 2000.
- 10 J. F. Richardson and J. H. Harker. Chemical Engineering, V2. Fifth edition. Linacre House, Jordan Hill, Oxford: Butterworth–Heinemann, 2002. – 1183 p.

### Дополнительная:

- 11 Муравьев И. А. Технология лекарств. Изд. 3-е, перераб. и доп. Т. I, М., «Медицина», 1980, 704 с, ил.
- 12 Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. 3-е изд. – Л.: Химия..
- 13 Жужиков В.А. Фильтрование. 4-е изд. М.: Химия, 1986
- 14 Ақбердиев Ә.С., Молдабеков Ш.М. Химиялық технологияның негізгі процестері және аппараттары, 1-ші бөлім, Алматы; 1993 ж.
- 15 Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. В 5Т. Т1//Под ред. А.М. Кутепова – М.: Логос, 2001
- 16 Фармацевтическая технология. Под ред. И.И. Краснюка и Г.В. Михайловой–Москва, Академия



|                                                                                                       |                                                                                   |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                   |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                   |                                                                                                  |

– 2006 г.

## Контроль (вопросы, тесты, задачи и пр.)

### Контрольные вопросы

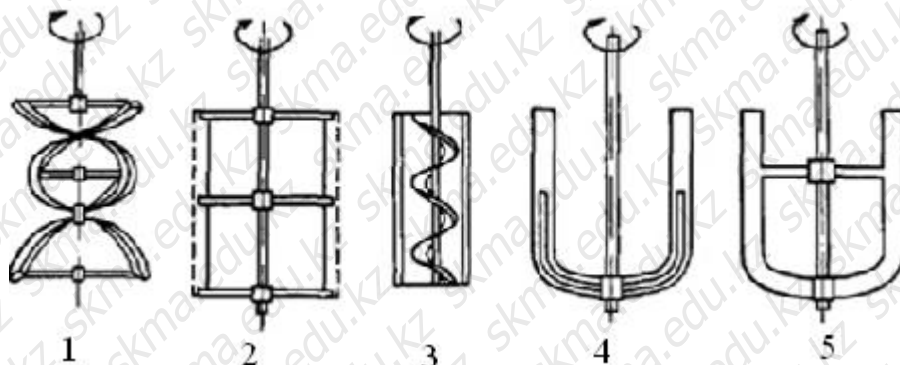
1. Промышленное значение процесса перемешивания.
2. Типы механических мешалок.
3. Какие параметры оказывают основное влияние на расход мощности при перемешивании?
4. Вид и практическое значение обобщенного критериального уравнения для процесса перемешивания.
5. Порядок выполнения работы.
6. Почему при обработке данных более рационально применять логарифмическую систему координат?
7. Порядок проверки воспроизводимости опытов и ее значение при проведении экспериментальных исследований.

### Задания в тестовой форме

1. Механическое перемешивание в жидких средах осуществляется:  
сжатым воздухом  
в трубопроводах  
с помощью насосов  
**с помощью мешалок**  
с помощью сопел
2. Пневматическое перемешивание в жидких средах осуществляется:  
с помощью мешалок  
**сжатым воздухом**  
в трубопроводах  
с помощью насосов  
с помощью сопел
3. При перемешивании течение жидкости, направленное параллельно оси вращения мешалки, называется:  
тангенциальное  
радиальное  
**осевое**  
ламинарное  
турбулентное
4. При перемешивании течение жидкости, которое характеризуется направленным движением жидкости от мешалки к стенкам аппарата перпендикулярно оси вращения мешалки, называется:  
осевое  
**радиальное**  
тангенциальное  
ламинарное  
турбулентное
5. При перемешивании течение жидкости в аппарате преимущественно по концентрическим окружностям, параллельным плоскости вращения мешалки, называется:  
**тангенциальное**  
радиальное  
осевое  
турбулентное  
ламинарное
6. Механическое перемешивание в жидких средах осуществляется:  
сжатым воздухом  
в трубопроводах  
**с помощью мешалок**  
с помощью насосов  
с помощью сопел
7. Пневматическое перемешивание в жидких средах осуществляется:  
с помощью мешалок  
в трубопроводах  
с помощью насосов  
с помощью сопел  
**сжатым воздухом**
8. Қалақты былғауыштар ... болып табылады.  
**якорлы**

рамалы  
паракты  
пропеллерлі  
турбиналы

9. На рисунке показаны конструкции различных мешалок. Покажите на рисунке рамную мешалку.



3  
5  
4  
1  
2

10. Укажите определение циркуляционного перемешивания.

Перемешивание осуществляется с помощью сжатого газа (в большинстве случаев воздуха), пропускаемого через слой перемешиваемой жидкости.

Перемешивание осуществляется в статических смесителях за счет кинетической энергии жидкости или газа.

Перемешивание осуществляется с помощью различных перемешивающих устройств – мешалок.

Перемешивание осуществляется с помощью насоса, перекачивающего жидкость по замкнутой системе смеситель – насос – смеситель.

Перемешивание осуществляется в поле электростатических сил.



|                                                                                                       |                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                                                                                                                   |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                                                                                                                   |

**Тема 11:** Исследование процесса измельчения в молотковой дробилке.

**Цель:** Ознакомление с устройством и работой молотковой дробилки.

**Задачи обучения:**

**Студент должен знать:**

- виды измельчения;
- методы измельчения;
- расход энергии на измельчение.

**Студент должен уметь:**

- Определять степень измельчения материала;
- Определять производительность молотковой дробилки
- Определять потребляемую мощность электродвигателя дробилки
- Определять средние размеры частиц до и после измельчения

**Основные вопросы темы:**

- Степень измельчения.
- Средние размеры частиц до и после измельчения
- Производительность молотковых дробилок
- Потребляемая мощность электродвигателя дробилки

**Методы обучения и преподавания:**

Студенты должны разобраться в физических основах измельчения и конструкции молотковой дробилки. На виртуальной лабораторной установке:

1. Пройти тестирование по основным характеристикам молотковой дробилки.
2. Измельчить в молотковой дробилке заданную порцию материала.
3. Провести ситовый анализ. Определить степень измельчения материала.
4. Установить зависимость производительности дробилки и степени измельчения от размеров решетки.
5. Построить кривые распределения измельченного материала по размерам

**Теоретические сведения.**

Эффективным способом измельчения твердых материалов является ударное разрушение. Машины ударного действия имеют лучшие технологико-экономические показатели по сравнению с машинами другого принципа действия. Из машин ударного действия наиболее перспективными являются молотковые дробилки, применяемые в тех случаях, когда на одной ступени измельчения необходимо получить высокодисперсную смесь измельченных частиц. Молотковые дробилки хорошо измельчают хрупкие материалы (зерно, соль, сахар и др.) и менее эффективны при измельчении влажных материалов и продуктов с высоким содержанием жира. Наибольшее распространение получили дробилки со свободно подвешенными молотками.

Молотки должны перемещаться с такой окружной скоростью, при которой обеспечивается первичное разрушение материала в момент ударов по нему молотком. Эту необходимую скорость можно определить приближенно, исходя из закона количества движения:

$$m(W_2 - W_1) = P\tau \quad (14.1)$$

где  $m$  – масса измельчаемой частицы, кг;

$W_2$  – скорость частицы после удара о молоток, м/с;

$W_1$  – скорость частицы до удара о молоток, м/с;

$P$  – сила удара, необходимая для первичного разрушения частицы, Н;

$\tau$  – продолжительность удара, которая может быть принята равной  $10^{-5}$  м.с.

Так как  $W_1$  значительно меньше  $W_2$ , то можно принять  $mW_2 = P\tau$

Эффективность измельчения на молотковых дробилках оценивается степенью измельчения, производительностью, удельным расходом энергии на проведении процесса.

Степенью измельчения  $i$  называется отношение среднего размера частиц исходного диаметра  $D_{cp}$  к среднему размеру частиц измельченного продукта  $d_{cp}$ :

$$i = \frac{D_{cp}}{d_{cp}} \quad (14.2)$$

Для определения среднего размера частиц до и после измельчения среднюю пробу материала просеивают через набор

|                                                                                                       |                                                                                   |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| <p>Кафедра инженерных дисциплин<br/>Методические указания для лабораторных занятий</p>                |                                                                                   |                                                                                                  |

сит с отверстиями разных размеров и получают несколько фракций. Для каждой фракции находят средний размер частиц фракции, как полусумму размеров отверстий в сите, которые прошли частицы, и на котором частицы остались:

$$d_{cp} = \frac{d_{i-1} + d_i}{2} \quad (14.3)$$

Практически размер максимальных частиц определяется размером отверстий сита, через которые проходит весь материал данной фракции, а размер минимальных частиц – размером отверстий сита, на котором данная фракция материала находится.

Средний размер частиц в смеси вычисляется по уравнению:

$$d_i^{\phi} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i}{d_{cpi}} \right)} \quad (14.4)$$

где  $x_i \dots x_n$  – средний размер частиц каждой фракции;

$d_{cp1} \dots d_{cpn}$  – относительное массовое содержание каждой фракции в смеси:

$$X_i = \frac{G_i}{\sum_{i=1}^n G_i} \quad (14.5)$$

где  $G_i$  – масса остатка на  $i$ -м сите.

Производительность молотковых дробилок зависит не только от вида и свойства материала, но и от числа оборотов вала, на котором крепятся молотки, от размеров дробилки, размеров решетки на выходе из дробилки.

Производительность  $Q$  молотковых дробилок:

$$Q = K_1 \rho D_p L n \quad (14.6)$$

где  $K_1$  – эмпирический коэффициент, который зависит от типа и размеров отверстий решетки, физико-механических свойств сырья и конструктивных особенностей молотковых дробилок;

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

$D_p$  – диаметр ротора дробилки, м;

$L$  – длина ротора дробилки, м;

$n$  – частота вращения ротора, с<sup>-1</sup>.

Потребляемая мощность  $N$  электродвигателя дробилки на процесс измельчения:

$$N = K_1 K_2 D_p^2 n \quad (14.7)$$

где  $K_2$  – эмпирический коэффициент, который в основном зависит от получаемой степени измельчения и физико-механических свойств измельчаемого материала, кВт/кг.

Значения эмпирических коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  следующие: для сит с диаметром отверстий до 3 мм  $K_1$  от  $3,6 \cdot 10^{-5}$  до  $4,7 \cdot 10^{-5}$ ; для чешуйчатых сит с диаметром отверстий от 4–5 до 10 мм  $K_1$  от  $6,0 \cdot 10^{-5}$  до  $10,5 \cdot 10^{-5}$  (меньшее значение коэффициента  $K_1$  принимают для сит с меньшим размером отверстий),  $K_2$  от 2,0 – 4,0 (меньшее значение коэффициента  $K_2$  принимают при крупном размоле, а большее – при мелком размоле).

### Цель работы

1. Ознакомление с устройством и работой молотковой дробилки.
2. Измельчение в молотковой дробилке заданной порции материала.
3. Проведение ситовых анализов. Определение степени измельчения материала.
4. Установление зависимости производительности дробилки и степени измельчения от размеров решетки.
5. Построение кривых распределения измельченного материала по размерам.

### Описание экспериментальной установки

На рисунке 14.1 показана схема молотковой дробилки. Дробилка работает от электродвигателя 9, на валу которого закреплены литые молотки 7, вращающиеся в литой рабочей камере 8, в которой происходит измельчение.

Материал из бункера 6 поступает в рабочую камеру дробилки, где в результате ударного воздействия молотков и истирания материала при движении в кольцевом вращающемся слое о стенки рабочей камеры дробилки происходит интенсивное его разрушение.

Материал находится в зоне измельчения до тех пор, пока частицы его не пройдут через сменную решетку 5, установленную в нижней части дробилки. Измельченный материал собирается в емкость 3. Изменяя размеры отверстий решетки, регулируют крупность дробленого продукта. При опорожнении емкости 3 отвинчивают пробку 1 и полученный



продукт через патрубок 2 поступает в емкость для готового продукта.

При работе дробилки через бункер 6 подсасывается окружающий воздух. Он проходит через решетку в сборную емкость 3, из которой удаляется через пылефильтрующий рукав 4.

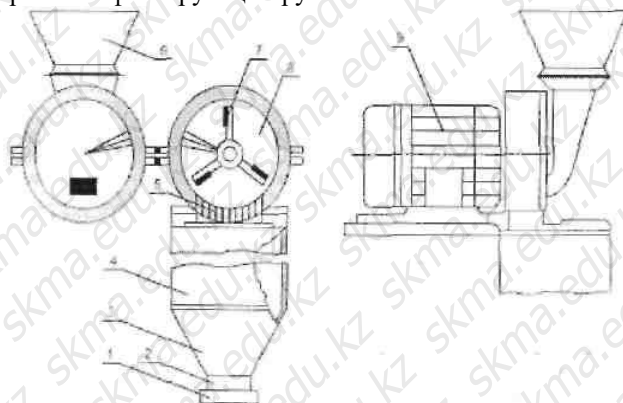


Рисунок 14.1. Схема молотковой дробилки

#### Методика выполнения работы

Устанавливают сменную решетку 5 с заданным размером отверстий. Порцию зерна  $G_{нач}$  по указанию преподавателя засыпают в бункер. Включают электродвигатель. Открывают задвижку под бункером и одновременно включают секундомер. По окончании измельчения останавливают секундомер, выключают электродвигатель. Взвешивают измельченный материал  $G_{кон}$ , затем проводят ситовой анализ. Сита располагают в порядке уменьшения размеров их отверстий сверху вниз.

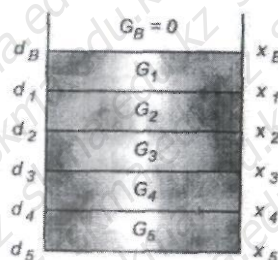


Рисунок 14.2. Набор сит с размерами ячеек  $d$ :  
 $d_1 = 3 \text{ мм}$ ;  $d_2 = 2 \text{ мм}$ ;  $d_3 = 1 \text{ мм}$ ;  $d_4 = 0,5 \text{ мм}$ ;  $d_5 = 0$ .

Массу взвешенной сухой пробы, указанную преподавателем, помещают на верхнее наиболее грубое сито и затем его встряхивают вручную. По окончании рассева взвешивают остаток на каждом сите, включая также материал, попавший на дно сборника.

Данные измерений и результаты ситового анализа необходимо внести в таблицу 14.1 и 14.2.

Опыты проводят при различных размерах решетки. Для определения среднего размера частиц материала после измельчения проводят ситовой анализ.

Таблица 14.1

| № опыта | Размер решетки, мм | $\tau$ , сек | $G_{нач}$ , кг | $G_{кон}$ , кг |
|---------|--------------------|--------------|----------------|----------------|
| 1       |                    |              |                |                |
| 2       |                    |              |                |                |
| 3       |                    |              |                |                |

Таблица 14.2

| № опыта | Диаметр отверстий, мм |       |       |       |       |       | Остаток на сите, г |       |       |       |       |
|---------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
|         | $d_0$                 | $d_1$ | $d_2$ | $d_3$ | $d_4$ | $d_5$ | $G_1$              | $G_2$ | $G_3$ | $G_4$ | $G_5$ |

|                                                                                                                                                                                                                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <p style="text-align: center;"> ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/> «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ </p>                                                                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <p style="text-align: center;">  SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/> АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» </p> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                                                                                                                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                                                                                                                                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1                                                                                                                                                                                                                                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2                                                                                                                                                                                                                                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3                                                                                                                                                                                                                                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

### Обработка опытных данных и составление отчета

1. Производительность молотковой дробилки  $Q$  определяют с использованием данных таблицы 14.1 по формуле, кг/с:

$$Q = \frac{G_{\text{нач}}}{\tau}$$

2. По формулам (14.3), (14.4), (14.5) с использованием опытных данных ситового анализа (табл. 14.2) определяют средний размер частиц в смеси  $d_i^\phi$ , мм.
3. Степень измельчения материала  $i$  вычисляют по формуле (14.2).
4. Полученные расчетные данные заносят в таблицу 14.3.

Таблица 14.3

| №<br>опы<br>та | Размер<br>решетки, мм. | Средний размер частиц каждой<br>фракций, мм |           |           |           |           | Относительное массовое<br>содержание каждой<br>фракции в смеси, мм |       |       |       |       | $d_i^\phi$ ,<br>мм | $Q$ ,<br>кг/с | $i$ |
|----------------|------------------------|---------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|---------------|-----|
|                |                        | $d_{cp1}$                                   | $d_{cp2}$ | $d_{cp3}$ | $d_{cp4}$ | $d_{cp5}$ | $x_1$                                                              | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ |                    |               |     |
| 1              |                        |                                             |           |           |           |           |                                                                    |       |       |       |       |                    |               |     |
| 2              |                        |                                             |           |           |           |           |                                                                    |       |       |       |       |                    |               |     |
| 3              |                        |                                             |           |           |           |           |                                                                    |       |       |       |       |                    |               |     |

5. По результатам ситового анализа представляют кривые функции распределения измельченного материала по диаметрам частиц  $R(d)$  (рис. 14.3).

Функция  $R(d)$  равна выраженному в процентах отношению массы всех частиц, диаметр которых больше  $d$ , к общей массе пробы измельченного материала. Величина  $d$  определяется по диаметру отверстий сита.



|                                                                                                       |  |                                                                                   |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |  |                                                                                   |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |  |                                                                                   |                                                                                                  |

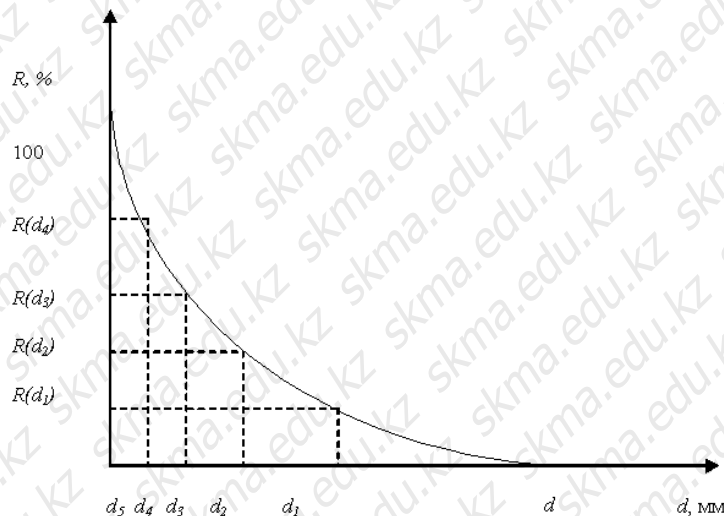


Рисунок 14.3. Кривая распределения измельченного материала.

$$R(d_1) = x_1 100; R(d_2) = (x_1 + x_2) 100; R(d_3) = (x_1 + x_2 + x_3) 100; \\ R(d_4) = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) 100.$$

6. По результатам опытов строятся зависимости:  $Q = f(i)$ .

В заключение делают вывод о влиянии размера решетки в молотковой дробилке на степень измельчения и производительность.

#### Порядок выполнения виртуальной лабораторной работы

Цель данной работы – ознакомиться с работой молотковой дробилки на примере дробления трех порций гороха каждая по 100 грамм. Дробление должно проводиться с использованием трех сменных решеток с разными отверстиями, диаметром 1, 2, 3 мм. Таким образом, можно будет оценить степень влияния размера отверстий решетки на процесс измельчения и на производительность дробилки.

По результатам ситового анализа и последующего взвешивания различных фракций дробленого гороха можно будет построить кривые распределения измельченного материала по диаметрам частиц.

Виртуальное оборудование максимально приближено к реальному и подчиняется тем же командам. Наиболее сложным является измерение времени, затраченного на дробление. В момент открытия заслонки и начала дробления автоматически запускается таймер. Но остановить таймер можно будет только по завершении процесса дробления, о чем будет свидетельствовать возвращение стрелки ваттметра к значению мощности холостого хода и появление на таймере вращающихся лепестков. При этом необходимо поместить курсор в область таймера и нажать левую кнопку мыши.

Все манипуляции на экране производятся при помощи мыши. Для управления кнопками прибора достаточно поместить курсор в красную область управляемого объекта, либо на сам объект, нажать левую кнопку и перемещать мышь в нужном направлении.

Выполнять работу необходимо строго придерживаясь инструкции, иначе можно будет получить некорректные данные. Обратите внимание, что измеренное время, затраченное на дробление каждой порции гороха, необходимо вносить в таблицу измеряемых параметров самостоятельно. В то время как вес измеряемых фракций будет добавляться в таблицу автоматически.

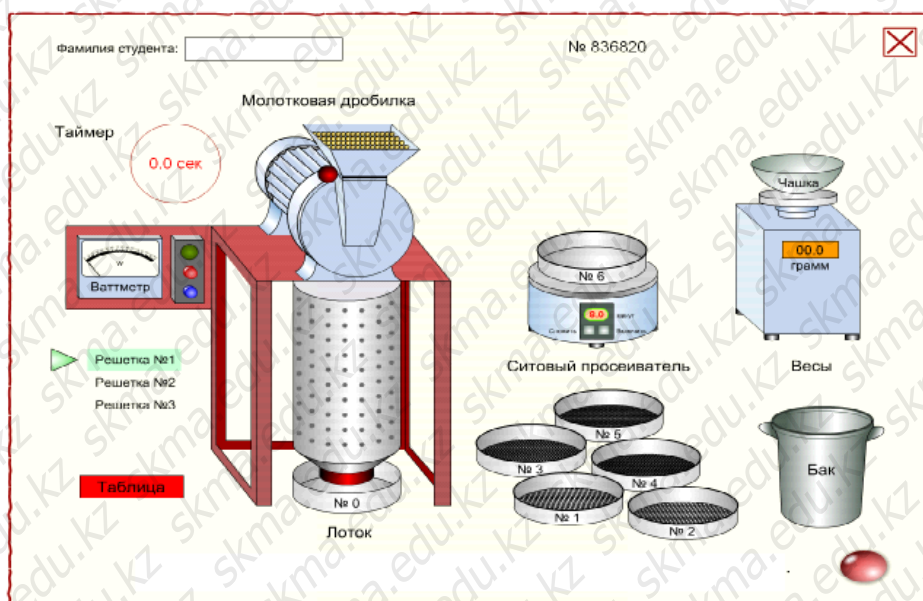
#### Инструкция по выполнению виртуальной лабораторной работы

1. Включите синюю кнопку «Пуск» на панели управления электрическим двигателем дробилки и определите потребляемую мощность холостого хода дробилки.
2. Начните первый опыт дробления порции гороха с решеткой № 1, установленной в нижней части дробилки, для чего нажмите красный кружок задвижки под бункером и определите максимальную мощность, потребляемую электродвигателем в процессе дробления.
3. По завершении процесса дробления, когда потребляемая двигателем мощность упадет до значения холостого хода, поместите курсор в область таймера и нажмите левую кнопку мыши. Запишите в таблицу измеряемых параметров время, потраченное на дробление данной порции гороха.
4. Выключите дробилку, нажимая красную кнопку «Стоп» на панели управления двигателем.
5. Нажмите кнопку красного цвета, расположенную внизу пылефильтрующего рукава, и выгрузите дробленый продукт в лоток.

|                                                                                                              |                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/><b>MEDISINA<br/>AKADEMIASY</b><br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/><b>MEDICAL<br/>ACADEMY</b><br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                 |                                                                                                         |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                               |                                                                                                         |

6. Нажмите кнопку «Сложить» ситового просеивателя. Поместите лоток с продуктом над верхним ситом рассеивателя и убедитесь в том, что лоток накрыл верхнее сито.
7. Нажмите кнопку «Включить» ситового просеивателя и наблюдайте процесс рассеивания дробленого продукта по фракциям через сита в течение ускоренных 8-ми виртуальных минут.
8. Снимите пустой лоток и поместите его под пылефильтрующий рукав.
9. Снимите сито № 1 и поместите его вниз, на исходную позицию.
10. Снимите сито № 2 и поместите его над чашкой, установленной на весах. Убедитесь, что вес данной фракции появился на цифровом табло весов, и перенесите чашку в бак для ее опорожнения.
11. Повторите операцию взвешивания фракций для всех оставшихся сит.
12. Убедитесь, что виртуальное оборудование переключилось в режим дробления новой порции гороха, с решеткой № 2.
13. Повторите все действия от пункта 1 до пункта 11 с решеткой № 2.
14. Убедитесь, что виртуальное оборудование переключилось в режим дробления новой порции гороха, с решеткой № 3
15. Повторите все действия от пункта 1 до пункта 11 с решеткой № 3
16. К этому моменту все данные и измеренные значения должны быть внесены в таблицу измеряемых параметров и потому она может быть сохранена для последующего включения в отчет о выполненной лабораторной работе. Перед сохранением итоговой таблицы внесите свою фамилию в соответствующую строчку ввода «Фамилия студента», и нажмите клавишу «PrtScSysRq» на клавиатуре компьютера, тем самым экранное изображение таблицы со всеми данными будет скопировано в системный карман (буфер обмена) компьютера.

Откройте в программе WORD новый документ и с помощью стандартной команды «Вставить» перенесите экранное изображение лабораторной работы с таблицей в документ WORD. Теперь можно сохранить полученный документ на любом носителе и передать его преподавателю для проверки.



## 5 Литература

### Основная:

- 1 Промышленная технология лекарств, Том 1. Под ред. Чуешова В.И. – Х.: МТК-Книга, Издательства НФАУ, 2002 – 560 с.
- 2 Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: ООО ТИД "Альянс", 2004. – 753 с.
- 3 Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. В 2-х кн. / Ю.И.Дытнерский. – М.: Химия, 2002. – 400–368 с
- 4 Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков; под ред. П.Г. Романкова. - 14-е изд., стер. - М.: Альянс, 2007. С. 576
- 5 Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию: Учебное пособие для студ. химико-технологических спец. вузов; Допущено Гос. комитетом СССР / Г. С.



|                                                                                                       |                                                                                   |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  | <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |                                                                                   |                                                                                                  |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |                                                                                   |                                                                                                  |

- 6 Борисов [и др.]; под ред. Ю.И. Дытнерского. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Альянс, 2008. - 496 с
- 7 Плаксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. - М.: Колос, 2008. - 760 с.
- 8 Ешова Ж.Т. Химиялық технологияның негізгі процестері мен аппараттары: Оқу құралы. - Алматы Қазақ университеті, 2007. - 237б.
- 9 Акбердиев Ә.С., Ханқожаев Ш.Х., Омарқұлов П.К. Тамақ өндірісінің процестері және аппараттары, 2-ші бөлім, Шымкент, 2004 ж.
- 10 Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. - М.: Колос, 2000.
- 11 J. F. Richardson and J. H. Harker. Chemical Engineering. V2. Fifth edition. Linacre House, Jordan Hill, Oxford: Butterworth -Heinemann, 2002. - 1183 p.
- 12 **Дополнительная:**
- 13 Муравьев И. А. Технология лекарств. Изд. 3-е, перераб. и доп. Т. I, М., «Медицина», 1980, 704 с, ил.
- 14 Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. 3-е изд. - Л.: Химия,.
- 15 Жужиков В.А. Фильтрование. 4-е изд. М.: Химия, 1986
- 16 Акбердиев Ә.С., Молдабеков Ш.М. Химиялық технологияның негізгі процестері және аппараттары, 1-ші бөлім, Алматы; 1993 ж.
- 17 Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. В 5Т. Т1//Под ред. А.М. Кутепова - М.: Логос, 2001
- 18 Фармацевтическая технология. Под ред. И.И. Краснюка и Г.В. Михайловой-Москва, Академия - 2006 г.

#### Контрольные вопросы

1. Каким образом оценивается эффективность измельчения?
2. Что называется степенью измельчения?
3. От чего зависит производительность молотковых дробилок?
4. Какие способы измельчения твердых материалов существуют?

#### Задания в тестовой форме

1. Укажите измельчающие оборудования раздавливающего действия.  
| конусные дробилки  
| **гладковалковые дробилки**  
| бегуны  
| зубовалковые дробилки  
| молотковые мельницы
2. Укажите измельчающие оборудования истирающе-раздавливающего действия.  
| **бегуны**  
| щековые дробилки  
| гладковалковые дробилки  
| дезинтеграторы  
| дисмембраторы
3. Укажите измельчающие оборудования ударного действия.  
| щековые дробилки  
| зубовалковые дробилки  
| **газоструйные мельницы**  
| бегуны  
| роliko-кольцевые дробилки
4. Укажите механический процесс, который проводится мокрым способом.  
| смешение  
| дробление  
| грохочение  
| классификация  
| **тонкое измельчение**
5. Барабанные мельницы работают по принципу использования:  
| центробежных сил  
| **мельющих тел и самоизмельчение**  
| гравитационных сил  
| сил тяжести

только самоизмельчения

6. Измельчение, классификацию и смешение ... называют механическими процессами.

металлических

**твердых материалов**

жидких

газообразных

пастообразных

7. Скорость процесса измельчения твердого материала повышается:

с уменьшением поверхности твердого тела

с увеличением поверхности измельчаемого твердого тела

с увеличением твердости на поверхности измельчаемого тела

**с увеличением давления на поверхности измельчаемого тела**

с понижением температуры поверхности твердого тела

8. Поверхность твердого тела увеличивают...

обогащением

грохочением

сепарацией

сортировкой

**измельчением**

9. Измельчение твердого материала осуществляют...

продольным изгибом

растяжением

**раздавливанием**

поперечным изгибом

сложной деформацией

10. Измельчение твердого материала осуществляют...

**раскалыванием**

продольным изгибом

растяжением

поперечным изгибом

сложной деформацией



|                                                                                                       |  |                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ONTUSTIK QAZAQSTAN<br/>MEDISINA<br/>AKADEMIASY<br/>«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ</p> |  |  <p>SOUTH KAZAKHSTAN<br/>MEDICAL<br/>ACADEMY<br/>АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»</p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                          |  |                                                                                                                                                                                   |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                        |  |                                                                                                                                                                                   |

### Критерии и правила оценки знаний:

| №  | Форма контроля                                                                                                                                                 | Оценка                                                                                                                 | Критерии оценки                                                                                                                                                                                                                                                |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | <b>Устный ответ (Опрос)</b>                                                                                                                                    | Отлично<br>Соответствует<br>оценкам: А (4,0; 95-100%);<br>А- (3,67; 90-94%)                                            | Ставится в том случае, если студент во время ответа допустил каких-либо ошибок, неточностей.<br>Ориентируется в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и дает им критическую оценку, использует научные достижения других дисциплин.       |
|    |                                                                                                                                                                | Хорошо<br>Соответствует<br>оценкам: В+ (3,33; 85-89%);<br>В (3,0; 80-84%);<br>В- (2,67; 75-79%);<br>С+ (2,33; 70-74%); | Ставится в том случае, если студент во время ответа не допустил грубых ошибок при ответе, допускал не принципиальные неточности или принципиальные ошибки, исправленные самим студентом, сумел систематизировать программный материал с помощью преподавателя. |
|    |                                                                                                                                                                | Удовлетворит.<br>Соответствует<br>оценкам: С (2,0; 65-69%);<br>С- (1,67; 60-64%);<br>D+ (1,0; 50-54%)                  | Ставится в том случае, если студент во время ответа допускал неточности и не принципиальные ошибки, ограничивался только учебной литературой, указанной преподавателем, испытывал большие затруднения в систематизации материала.                              |
|    |                                                                                                                                                                | Неудовлетворительно<br>Соответствует<br>оценке F (0; 0-49%)                                                            | Ставится в том случае, если студент во время ответа допускал принципиальные ошибки, не проработал основную литературу по теме занятия, не умеет использовать научную терминологию дисциплины, отвечает с грубыми стилистическими и логическими ошибками.       |
| 2. | <b>Выполнение лабораторных работ, работа с аппаратурой, таблицами, обсуждение результатов исследования, оформление протоколов (Защита лабораторной работы)</b> | Отлично<br>Соответствует<br>оценкам: А (4,0; 95-100%);<br>А- (3,67; 90-94%)                                            | Своевременно и без каких-либо ошибок выполнил лабораторные работы и сдал отчеты по ним, принимал активное участие в обсуждении результатов работы, делал обоснованные заключения, проявил при этом оригинальное мышление                                       |
|    |                                                                                                                                                                | Хорошо<br>Соответствует<br>оценкам: В+ (3,33; 85-89%);<br>В (3,0; 80-84%);<br>В- (2,67; 75-79%);<br>С+ (2,33; 70-74%); | Своевременно выполнил лабораторные работы и сдал отчеты по ним без принципиальных замечаний, принимал активное участие в обсуждении результатов работы                                                                                                         |
|    |                                                                                                                                                                | Удовлетворит.<br>Соответствует<br>оценкам: С (2,0; 65-69%);<br>С- (1,67; 60-64%);<br>D+ (1,0; 50-54%)                  | Своевременно выполнил лабораторные работы и сдал отчеты по ним. Во время работы не проявлял активности, нуждался в помощи преподавателя                                                                                                                        |
|    |                                                                                                                                                                | Неудовлетворительно<br>Соответствует<br>оценке                                                                         | Несвоевременно сдал отчеты по лабораторным работам, допустил принципиальные ошибки при их                                                                                                                                                                      |

ОҢТҮСТІК ҚАЗАҚСТАН

**MEDISINA  
AKADEMIASY**

«Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ



SOUTH KAZAKHSTAN

**MEDICAL  
ACADEMY**

АО «Южно-Казахстанская медицинская академия»

Кафедра инженерных дисциплин

Методические указания для лабораторных занятий



|                                                                                                                          |  |                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p> ONTÜSTIK QAZAQSTAN<br/> <b>MEDISINA</b><br/> <b>AKADEMIASY</b><br/> «Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы» АҚ </p> |  |  <p> SOUTH KAZAKHSTAN<br/> <b>MEDICAL</b><br/> <b>ACADEMY</b><br/> АО «Южно-Казахстанская медицинская академия» </p> |
| Кафедра инженерных дисциплин                                                                                             |  |                                                                                                                                                                                                       |
| Методические указания для лабораторных занятий                                                                           |  |                                                                                                                                                                                                       |

|    |                          |                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                          | F ( 0; 0-49%)                                                                                                          | выполнении. Выполнил не все лабораторные работы, предусмотренные программой. Не принимал участия в обсуждении результатов работы.                                                                                                                                |
|    |                          | Хорошо<br>Соответствует<br>оценкам: B+ (3,33; 85-89%);<br>B (3,0; 80-84%);<br>B- (2,67; 75-79%);<br>C+ (2,33; 70-74%); | Активно участвовал в работе, показал знание материала, допускал не принципиальные неточности или принципиальные ошибки, исправленные самим студентом                                                                                                             |
|    |                          | Удовлетворит.<br>Соответствует<br>оценкам: C (2,0; 65-69%);<br>C- (1,67; 60-64%);<br>D+ (1,0; 50-54%)                  | При работе в группе был пассивен, допускал неточности и не принципиальные ошибки, испытывал большие затруднения в систематизации материала.                                                                                                                      |
|    |                          | Неудовлетворительно<br>Соответствует<br>оценке F ( 0; 0-49%)                                                           | Не принимал участие в работе группы, отвечая на вопросы преподавателя допускал принципиальные ошибки и неточности, не использовал при ответах научную терминологию.                                                                                              |
| 3. | Решение тестовых заданий | Отлично<br>Соответствует<br>оценкам: A (4,0; 95-100%);<br>A- (3,67; 90-94%)                                            | 90-100% правильных ответов                                                                                                                                                                                                                                       |
|    |                          | Хорошо<br>Соответствует<br>оценкам: B+ (3,33; 85-89%);<br>B (3,0; 80-84%);<br>B- (2,67; 75-79%);<br>C+ (2,33; 70-74%); | 70-89% правильных ответов                                                                                                                                                                                                                                        |
|    |                          | Удовлетворит.<br>Соответствует<br>оценкам: C (2,0; 65-69%);<br>C- (1,67; 60-64%);<br>D+ (1,0; 50-54%)                  | 50-69% правильных ответов                                                                                                                                                                                                                                        |
|    |                          | Неудовлетворительно<br>Соответствует<br>оценке F ( 0; 0-49%)                                                           | Менее 50% правильных ответов                                                                                                                                                                                                                                     |
|    |                          | Хорошо<br>Соответствует<br>оценкам: B+ (3,33; 85-89%);<br>B (3,0; 80-84%);<br>B- (2,67; 75-79%);<br>C+ (2,33; 70-74%); | Ставится в том случае, если студент во время выполнения и защиты не допустил грубых ошибок, допускал не принципиальные неточности или принципиальные ошибки, исправленные самим студентом, сумел систематизировать программный материал с помощью преподавателя. |
|    |                          | Удовлетворит.<br>Соответствует<br>оценкам: C (2,0; 65-69%);<br>C- (1,67; 60-64%);<br>D+ (1,0; 50-54%)                  | Ставится в том случае, если студент во время выполнения и защиты допускал неточности и не принципиальные ошибки, ограничивался только учебной литературой, указанной преподавателем, испытывал большие затруднения в систематизации материала.                   |

Кафедра инженерных дисциплин

Методические указания для лабораторных занятий

Неудовлетворитель  
но Соответствует  
оценке F (0; 0-49%)

Ставится в том случае, если студент во время выполнения и защиты допускал принципиальные ошибки, не проработал основную литературу по теме занятия, не умеет использовать научную терминологию дисциплины, отвечает с грубыми стилистическими и логическими ошибками.



Кафедра инженерных дисциплин

Методические указания для лабораторных занятий

