

**Энгельсский технологический институт (филиал)  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения  
высшего образования  
«Саратовский государственный технический университет имени  
Гагарина Ю.А.»**

**Т.А. Мацнева, И.В. Черемухина**

# **ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Учебно-методическое пособие  
для студентов направлений  
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»,  
21.03.01 «Нефтегазовое дело»,  
18.03.01 «Химическая технология»

Энгельс 2024

## Содержание

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение                                                                              | 4  |
| Лабораторная работа №1 "Определение режимов движения потока"                          | 5  |
| Лабораторная работа №2 "Исследование коэффициента гидравлического трения"             | 9  |
| Лабораторная работа №3 "Определение коэффициентов местных сопротивлений"              | 13 |
| Лабораторная работа №4 "Исследование истечения жидкости через отверстия и насадки"    | 18 |
| Лабораторная работа №5 "Осаждение твёрдых частиц под действием силы тяжести"          | 25 |
| Лабораторная работа №6 "Определение констант фильтрации"                              | 35 |
| Лабораторная работа №7 "Исследование гидродинамических закономерностей кипящего слоя" | 43 |
| Лабораторная работа №8 "Определение расхода энергии на перемешивание"                 | 56 |
| Литература                                                                            | 72 |

## ВВЕДЕНИЕ

Целью лабораторного практикума по курсу «Процессы и аппараты химических технологий» является познание физических закономерностей процессов, определение их основных технологических параметров и факторов, влияющих на интенсивность протекания процессов и производительность оборудования.

Лабораторные занятия способствуют более глубокому усвоению лекционного курса, развитию навыков самостоятельного научного исследования, а также овладению методикой измерений и обработки экспериментальных данных.

Перед каждой лабораторной работой студент обязан проработать соответствующие теоретические части курса по рекомендуемой литературе и данному руководству, знать цель работы, сущность процессов изучаемого явления, порядок проведения исследования и необходимых вычислений.

Преподаватель, ведущий занятия, прежде чем допустить студента к работе, проверяет его подготовку.

Лабораторная работа выполняется каждым студентом самостоятельно или небольшой группой (по указанию преподавателя). Результаты исследований с соответствующими расчётами студент должен показать преподавателю и только после этого приступить к оформлению отчёта.

*Отчёт по выполненной работе* оформляется каждым студентом в специальной тетради или на отдельном листе. В отчёте указывается:

- 1) ФИО студента и учебная группа;
- 2) Название лабораторной работы;
- 3) Цель работы;
- 4) Схема лабораторной установки;
- 5) Протокол испытаний (таблица с измерениями);
- 6) Расчётная обработка измерений, получение зависимостей для изучаемого процесса;
- 7) Построение необходимых графиков; формулирование выводов по работе.

Оформление отчёта желательно производить в лаборатории непосредственно после выполнения работы или, в крайнем случае, дома в день выполнения работы. Предъявлять его преподавателю для защиты нужно не позже следующего лабораторного занятия.

Студенты, не выполнившие отчёт по предыдущей работе или не подготовившиеся к выполнению текущей, к лабораторным занятиям не допускаются. Выполнение лабораторных работ является строго обязательным.

По правильно оформленному отчёту студенту предлагается несколько вопросов. При положительном ответе на эти вопросы отчёт считается защищённым, а лабораторная работа – зачтённой.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА

### *Общие положения и цель работы*

*Цель работы:* ознакомление с изменениями, проходящими в потоке при различных режимах движения, и вычисление критериев Рейнольдса, соответствующих установленным режимам.

Исследованиями установлено, что для реальных (вязких) жидкостей существуют два резко различного вида движения - ламинарное (слоистое) и турбулентное (вихревое).

Ламинарным называется такой режим, при котором поток движется отдельными струйками и траектории частиц жидкости между собой не пересекаются, а турбулентным - когда струйчатость потока нарушается, и частицы жидкости совершают хаотичное движение.

Характер движения, как показали опыты, зависит от скорости движения, вязкости, плотности жидкости и геометрических размеров потока.

Влияние перечисленных параметров потока на характер движения определяется величиной безразмерного комплекса, называемого критерием Рейнольдса

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu},$$

где  $w$  – скорость потока, м/с;  $d$  – диаметр трубопровода, м;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Н·с/м<sup>2</sup>.

Опыты с различными жидкостями показали, что смена режимов движения происходит при определённом значении числа Рейнольдса, называемого критическим  $Re_{кр}$ .

Скорость, при которой происходит переход от одного режима к другому, называется критической.

При постепенном ускорении движение сохраняется ламинарным только до такой скорости – «верхней критической», - после которой наступает турбулентный режим. При проведении опытов в обратном порядке турбулентный режим сохраняется до скорости, называемой «нижней критической», и переходит в ламинарный

$$W_{кр.н} < W_{кр.в}.$$

«Нижней» и «верхней» критическим скоростям соответствуют «нижний» и «верхний» критерии Рейнольдса.

Для прямых и гладких труб гладкого сечения

$$Re_{кр.н} = 2320;$$

$$Re_{кр.в} = 10000.$$

Следовательно, при значениях  $Re < 2320$  возможен только ламинарный режим движения, а если  $Re > 10000$  – турбулентный.

В области, для которой  $2320 < Re < 10000$ , возможны оба режима – турбулентный и ламинарный. Эта область является неустойчивой и называется «переходной».

Характер движения рассматриваемого потока имеет решающее значение в расчётах, связанных с движением жидкости или газа.

### ***Описание лабораторной установки***

Схема установки приведена на рис. 1. Из городского водопровода 1 подают воду в напорный бак 2, регулируя подачу краном 3. Для предупреждения переполнения бака и поддержания в нем постоянного уровня воды установлена переливная труба 4.

Во время работы установки вода из напорного бака 2 поступает в стеклянную трубку 5, снабжённую запорно-регулировочным краном 6 и штуцером 7 для выпуска воды в приёмный бак 8.

Одновременно из сосуда 9 через запорно-регулировочный кран 10 и, установленную по оси стеклянной трубы 5, тонкую трубку 11 подаётся окрашенный раствор.

Расход воды через стеклянную трубу 5 определяется с помощью мерной ёмкости 12.

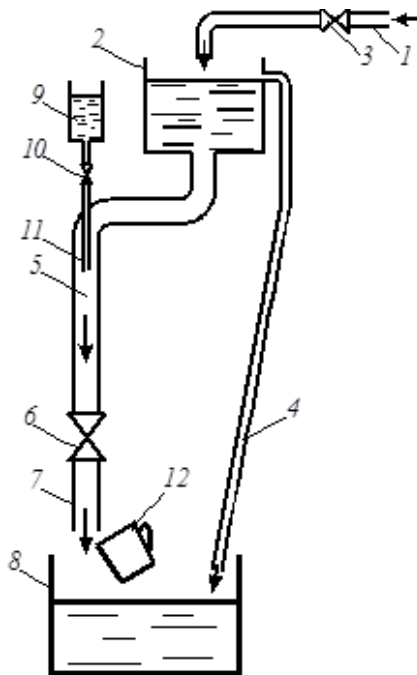


Рис. 1. Схема лабораторной установки для определения режимов движения потока:  
1 – водопровод; 2 – напорный бак; 3 – кран; 4 – сливная труба; 5 – стеклянная трубка;  
6, 10 – запорно-регулировочные краны; 7 – штуцер; 8 – приёмный бак;  
9 – сосуд с краской; 11 – тонкая трубка для выпуска краски; 12 – мерная ёмкость

### ***Порядок выполнения работы***

Перед началом работы необходимо проверить наличие воды в баке 2. Если ее недостаточно, открывается вентиль 3 и бак заполняется водой. Во время проведения работы уровень воды в баке 2 поддерживается

постоянным. Это обеспечивается путём непрерывного удаления избытка воды через сливную трубу 4 в приёмный бак 8.

Затем открывается вентиль 6 и устанавливается небольшой расход воды в трубе 5. Открытием вентиля 10 регулируется поступление окрашенной жидкости таким образом, чтобы она вытекала в трубку в виде тонкой струйки. Изменением расхода воды в трубке устанавливаются последовательно ламинарный, переходный, турбулентный режимы движения жидкости.

При каждом режиме замеряется расход воды. Для этого под штуцер 7 подставляется мерная емкость и по секундомеру замечается время заполнения емкости. Температура воды измеряется жидкостным термометром в приемном баке 8.

После проведения всех измерений производится обработка полученных результатов.

1. Определяется скорость движения воды в стеклянной трубе

$$w = \frac{V}{0,785d^2\tau}, \text{ м/с,}$$

где  $V$  - количество воды, поступившей в мерную емкость,  $\text{м}^3$ ;  $d$  - диаметр стеклянной трубы,  $\text{м}$ ;  $\tau$  - время заполнения мерной емкости,  $\text{с}$ .

2. Записывают значение температуры  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$  и по нему берутся  $\rho$  и  $\mu$  из [1].

3. Значения критерия Рейнольдса определяются по формуле

$$\text{Re} = \frac{wd\rho}{\mu}.$$

Результаты наблюдений, опытные и расчетные данные заносятся в табл.

- 1.

Таблица 1

Опытные и расчётные результаты

| № опыта | Время заполнения мерной ёмкости $\tau$ , с | Объем поступившей воды $V$ , $\text{м}^3$ | Скорость движения воды $w$ , $\text{м/с}$ | Re | Состояние подкрашенной струйки | Режим потока |
|---------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|----|--------------------------------|--------------|
| 1       |                                            |                                           |                                           |    |                                |              |
| 2       |                                            |                                           |                                           |    |                                |              |
| 3       |                                            |                                           |                                           |    |                                |              |
| ..      |                                            |                                           |                                           |    |                                |              |

При увеличении скорости течения жидкости по трубе наблюдаются следующие изменения окрашенной струйки:

- а) при малых скоростях течения воды окрашенная струйка не размывается, имея вид натянутой нити (ламинарный режим);

б) при увеличении скорости окрашенная струйка приобретает волнистые очертания, наблюдаются отдельные мелкие струи красителя (переходная область);

в) при достаточно большой скорости движения струйки краски полностью размываются, окраска жидкости монотонная (турбулентный режим).

Устойчивый режим движения устанавливается на расстоянии  $l=40d$  трубы от ввода жидкости.

### ***Контрольные вопросы***

1. Дайте определение режимов движения потока.
2. Что называется критической скоростью?
3. Критерий  $Re$  и его физический смысл.
4. Критическое значение критерия  $Re$ .
5. График распределения скоростей по сечению трубопровода при различных режимах.
6. Определение эквивалентного диаметра.
7. Понятие мгновенной и средней скорости.
8. Уравнение расхода.
9. Размерность  $\rho$  и  $\mu$  в различных системах.
10. Структура потока (ядро, пограничный слой).
11. Зависимость критерия Рейнольдса от температуры.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ

### *Общие положения и цель работы*

*Цель работы:* опытное определение коэффициентов гидравлического трения  $\lambda$  в круглой трубе при различных скоростях жидкости; построение графиков зависимости  $\lambda=f(Re)$  по опытными и расчетным данным.

При проектировании технологических установок необходимо знать гидравлические сопротивления прохождению потоков по коммуникациям и через отдельные аппараты. Расчет гидравлических сопротивлений определяет выбор давления, необходимого для транспортирования жидкостей и газов, а, следовательно, и выбор насосов, компрессоров и вентиляторов.

На преодоление гидравлического сопротивления расходуется часть или весь напор движущейся жидкости. Одна из составляющих потери напора  $h_{тр}$  (или давления  $\Delta P_{тр} = \rho g h_{тр}$ ) определяется в инженерных расчётах по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h_{тр} = \lambda \frac{w^2}{2g} \frac{l}{d_э}, \text{ м или } \Delta P_{тр} = \lambda \frac{\rho w^2}{2} \frac{l}{d}, \text{ Па,}$$

где  $l$  – длина трубы;  $d_э = 4f/\Pi$  – эквивалентный диаметр;  $w$  – средняя скорость;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  $g$  – ускорение свободного падения;  $f$  – площадь поперечного сечения канала;  $\Pi$  – смоченный периметр канала.

Данная составляющая обусловлена наличием трения потока о стенки канала и вязкости жидкости. Для ее расчета необходимо располагать значениями коэффициента гидравлического трения  $\lambda$ .

Если течение жидкости в прямом канале ламинарное ( $Re \leq 2300$ ), то коэффициент гидравлического трения может быть рассчитан по теоретической формуле

$$\lambda = \frac{A}{Re},$$

где  $Re = wd_э\rho/\mu = wd_э/\nu$  – число Рейнольдса;  $d_э = 4f/\Pi$  – эквивалентный диаметр канала;  $\mu$  и  $\nu$  динамический и кинематический коэффициенты вязкости;  $A$  – коэффициент зависящий от формы поперечного сечения канала, для круглых труб  $A=64$ , для труб квадратного сечения  $A=57$ , для сечения – равнобедренный треугольник  $A=53$ .

При турбулентном режиме течения дополнительное влияние на гидравлическое сопротивление начинают оказывать шероховатость поверхности стенок канала и турбулентная вязкость потока. Коэффициент

гидравлического трения здесь рассчитывают по эмпирическим формулам, полученным в результате обработки опытных данных. Известно много формул, в той или иной степени согласующихся между собой.

Удобна для использования в инженерных расчетах формула Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{68}{\text{Re}} + \frac{\Delta}{d_3} \right)^{0,25}, \quad (2.1)$$

где  $\Delta$  - средняя высота бугорков шероховатости на стенке.

В технических условиях средняя высота выступов шероховатости  $\Delta$  равна для цельнотянутых стальных труб -  $0,02 \div 0,1$  мм, для бывших в употреблении, незначительно коррозированных -  $0,1 \div 0,4$  мм.

Формула Альтшуля, как и всякая другая эмпирическая формула, имеет ограничения по изменению влияющих параметров. Она справедлива для интервала чисел Рейнольдса  $\text{Re} = 4 \cdot 10^3 \div 10^6$ .

При  $\text{Re} \frac{\Delta}{d_3} < 10$  (режим гидравлически гладких стенок) формула Альтшуля становится одночленной

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}. \quad (2.2)$$

Если  $\text{Re} \frac{\Delta}{d_3} > 500$  (режим развитой шероховатости стенок), то в формуле (2.1) малой величиной становится член  $\frac{68}{\text{Re}}$ , и в этом случае имеем

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d_3} \right)^{0,25}. \quad (2.3)$$

### ***Описание лабораторной установки***

Схема установки приведена на рис. 2. Вода из водопровода 1 поступает в расходный бак 2, откуда подаётся в прозрачную опытную трубку 4 с верхним и нижним участками.

Во входном и выходном сечениях трубы имеются сверления в стенках, из которых через трубки 5 жидкость поступает к пьезометрам 6 для измерения напора потока. На стенде пьезометры значатся под номерами 10 и 11.

Регулирование расхода воды через опытную трубку 4 осуществляется краном 7, а измерение расхода – с помощью мерной емкости 8.

При работе установки должен поддерживаться постоянный уровень воды в расходном баке 2. Это достигается за счет слива по трубе 9 части избытка подаваемой в бак 2 воды из водопровода 1.

Потоки воды из опытной трубы 4 и переливной трубы 9 поступают в приемный бак 10.

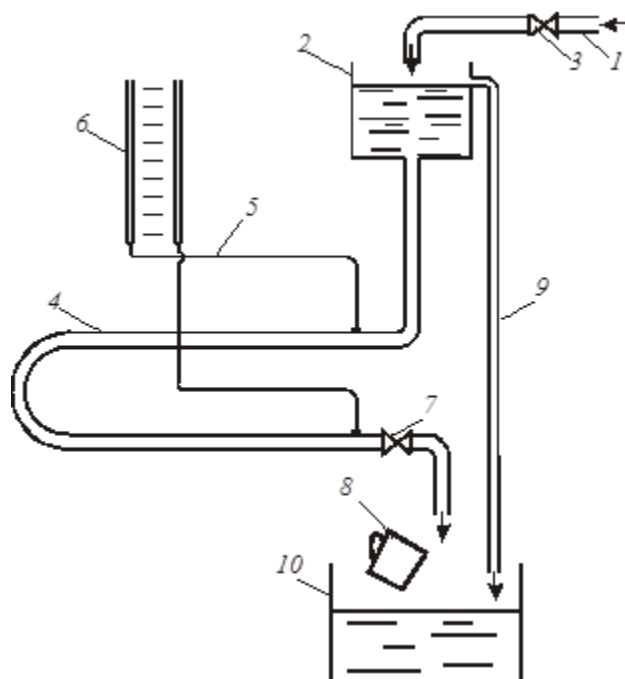


Рис. 2. Схема лабораторной установки для исследования коэффициента гидравлического трения: 1 - водопровод; 2 – расходный бак; 3, 7 – краны; 4 – опытная трубка; 5 - импульсная трубка; 6 – пьезометры; 8 – мерная ёмкость; 9 – переливная трубка; 10 – приёмный бак

### ***Порядок проведения работы***

Убедиться, что вода из водопровода 1 поступает в расходный бак 2 и идет перелив избытка воды через трубу 9.

Медленно открывая кран 7 и наблюдая за показаниями пьезометров 6, прекратить открытие крана 7 при достижении разности уровней столбов жидкости в пьезометрах 6 примерно  $10 \div 15$  мм вод. ст. Снять показания пьезометров и измерить расход жидкости с помощью мерной емкости 8.

Далее, постепенно открывая кран 7, устанавливать расходы жидкости ( $5 \div 6$  раз до максимального значения) при которых измерить напоры в пьезометрах и величину расхода. При этом нужно наблюдать за наличием стока из переливной трубы 9 и при необходимости увеличивать подачу воды в расходный бак 2, открывая кран 3 на водопроводе 1.

Температура воды измеряется термометром в приемном баке 10.

Результаты измерений заносятся в табл. 2.

После завершения измерений перекрыть кран 3 для подачи воды из водопровода 1.

### ***Обработка опытных данных***

Для каждого опытного измерения производятся вычисления в следующем порядке.

1. Расход воды  $Q = V / \tau, \text{м}^3/\text{с}$ , где  $V$  – количество воды, поступившей в мерную емкость,  $\text{м}^3$ ;  $\tau$  – время заполнения мерной емкости, с.

2. Средняя в сечении скорость движения воды в опытной трубе  $w = 4Q/(\pi d^2)$ , м/с, где  $d$  – внутренний диаметр трубы.

3. Число Рейнольдса  $Re = \frac{wd\rho}{\mu}$ , где  $\rho$  – плотность и  $\mu$  – динамический

коэффициент вязкости воды, берутся из [1, 2] при измеренной температуре.

4. Напор, затрачиваемый на преодоление сопротивления трения в опытной трубе  $h_{тр} = \Delta h$ , м вод. ст., где  $\Delta h$  – разность уровней в пьезометрах 6.

5. Опытный коэффициент гидравлического трения  $\lambda_{тр} = h_{тр} \frac{2g}{w^2} \frac{d}{l}$ , где  $l$  – длина опытной трубы по пути следования потока между входным и выходным сечением, м.

6. Расчетный коэффициент гидравлического трения  $\lambda_p$  определяется в зависимости от величины числа  $Re$  по одной из формул (2.1- 2.3).

Результаты расчетов заносятся в табл. 2. На миллиметровой бумаге строятся графики зависимостей  $\lambda_{оп}=f(Re)$  и  $\lambda_p=f(Re)$ . При наличии расхождений кривых устанавливается возможная причина различия.

Таблица 2

Опытные и расчётные результаты

| № опыта | Показания пьезометров         |                                | Время заполнения мерной емкости $\tau$ , с | Расход воды $Q$ , м <sup>3</sup> /с | Скорость воды $w$ , м/с | Критерий Рейнольдса $Re$ | $h_{тр}$ , м вод. ст. | Коэффициент трения |             |
|---------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|-------------|
|         | левого $h_{6,1}$ , м вод. ст. | правого $h_{6,2}$ , м вод. ст. |                                            |                                     |                         |                          |                       | $\lambda_{оп}$     | $\lambda_p$ |
| 1       |                               |                                |                                            |                                     |                         |                          |                       |                    |             |
| 2       |                               |                                |                                            |                                     |                         |                          |                       |                    |             |
| 3       |                               |                                |                                            |                                     |                         |                          |                       |                    |             |
| ...     |                               |                                |                                            |                                     |                         |                          |                       |                    |             |

### Контрольные вопросы

1. Виды гидравлических сопротивлений.
2. Уравнение Бернулли. Статистический, геометрический, скоростной напоры.
3. Определение потерь напора на трение.
4. Влияние шероховатости стенок канала на потери напора.
5. Влияние скорости на потери напора.
6. Эквивалентный диаметр.
7. Режимы движения жидкости, число  $Re$ .
8. Единицы измерения  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\rho$ .
9. Уравнение расхода.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ*****Общие положения и цель работы***

*Цель работы:* опытное определение коэффициентов местных сопротивлений расширения и сужения трубы, колена, плавного закругления, крана, вентиля; сравнение опытных значений  $\xi$  с расчетными и табличными данными.

Наряду с потерями напора на преодоление сил вязкого трения, которые пропорциональны длине канала, поток жидкости теряет свой напор в местных сопротивлениях – запорная и регулирующая арматура (краны, вентили, задвижки), повороты, расширения или сужения трубопроводов. В этих элементах трубопроводных систем происходит изменение скорости напора либо по величине, либо по направлению, либо одновременно по величине и направлению. И потери на трение и потери в местных сопротивлениях, в конечном счете, обусловлены вязкостью жидкости, а следовательно, теряемая механическая энергия рассеивается и переходит в тепловую.

В инженерной практике потери напора  $h_m$  (или давления  $\Delta P_m = \rho g h_m$ ) потока в местных сопротивлениях определяют по формуле Вейсбаха

$$h_m = \xi \frac{w^2}{2g}, \text{ м или } \Delta P_m = \xi \frac{\rho w^2}{2}, \text{ Па,} \quad (3.1)$$

где  $w$  – средняя скорость движения потока, м/с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение в поле действия силы тяжести, равно 9,81 м/с<sup>2</sup>;  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициенты различных видов местных сопротивлений находят обычно опытным путем, их средние значения приводятся в справочной и учебной литературе. Для определенного вида местного сопротивления  $\xi$  зависит от числа Рейнольдса, если течение ламинарное, и становится постоянной величиной при развитом турбулентном режиме течения.

В формуле (3.1) скорость может быть принята до или после сопротивления. В зависимости от этого разными будут численные значения коэффициента  $\xi$ . Поэтому всегда нужно указывать, какая скорость выбрана в качестве определяющей при вычислении  $\xi$ . Чаще используется в качестве определяющей максимальная скорость в местном сопротивлении, отнесенная к минимальному его проходному сечению.

В технических устройствах часто встречаются внезапные расширения и сужения канала. При внезапном расширении, например, напор теряется вследствие удара потока, выходящего с большой скоростью из части трубопровода с меньшим диаметром, в поток, движущийся медленнее в части, где диаметр больше. При этом, в области, примыкающей к прямому углу трубы более широкого сечения, возникают обратные токи – завихрения, на образование которых бесполезно тратится часть энергии потока.

Коэффициент местного сопротивления, отнесенный к скорости в меньшем сечении, может быть определен по формулам:

$$\text{для сужения } \xi = 0,5(1 - d^2/D^2); \quad (3.2)$$

$$\text{для расширения } \xi = (1 - d^2/D^2)^2, \quad (3.3)$$

где  $d$  – диаметр малого сечения канала;  $D$  – диаметр большого сечения канала.

Значения коэффициентов  $\xi$  для некоторых местных сопротивлений приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Коэффициенты местных сопротивлений

| Вид местного сопротивления                                               | Коэффициент<br>местного<br>сопротивления |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Колено (без закругления) с поворотом потока на 90°                       | 1,1-1,3                                  |
| Плавное закругление (отвод) на 90° с относительным радиусом $R/d \geq 3$ | 0,08-0,1                                 |
| Кран пробковый:                                                          |                                          |
| - при полном открытии;                                                   | 0,2                                      |
| - при угле открытия 30-40°                                               | 4-11                                     |
| Вентиль нормальный                                                       | 4,5-5,5                                  |

### *Описание лабораторной установки*

Схема установки приведена на рис. 3. Из водопровода 1, с регулируемым краном 2 расходом, вода поступает в расходный бак 3. Для поддержания постоянного уровня жидкости бак 3 снабжён переливной трубой 4.

Из расходного бака 3 вода под постоянным напором подается в контур, в котором последовательно проходит местные сопротивления: внезапное расширение трубы 5; внезапное сужение 6; колено без закругления 7; отвод с закруглением 8; кран пробковый 9; вентиль 10. Расход воды через контур устанавливается краном 11 и измеряется с помощью мерной емкости 12.

Слив воды из контура и переливной трубы осуществляется в приемный бак 13.

Через сверления в стенке контура и трубки 14 подается вода в пьезометры 15 для измерения напора в сечениях потока до и после каждого местного сопротивления. Цифры над пьезометрами на рис. 3 соответствуют их номерам на стенде.

При работе установки должен поддерживаться постоянный уровень воды в расходном баке 3. Это достигается за счет слива по трубе 4 части избыточно подаваемой в бак 3 воды из водопровода 1.

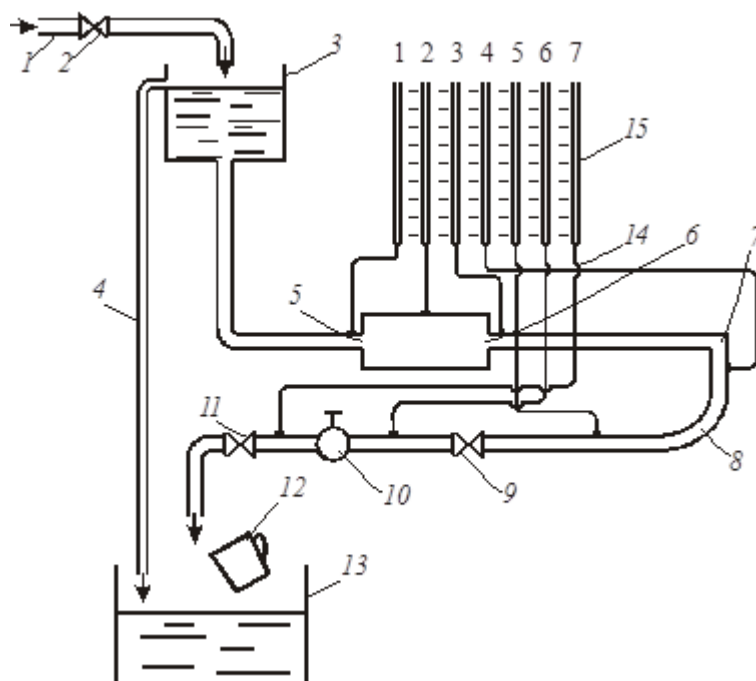


Рис. 3. Схема лабораторной установки для определения коэффициентов местных сопротивлений: 1 – водопровод; 2, 9, 11 – краны; 3 – расходный бак; 4 – переливная трубка; 5 – внезапное расширение; 6 – внезапное сужение; 7 – колено; 8 – закруглённое колено; 10 – вентиль; 12 – мерный сосуд; 13 – приёмный бак; 14 – импульсная трубка; 15 – пьезометры

### ***Порядок проведения работы***

Открыв кран 2, наполнить водой бак 3 до отверстия слива в переливную трубу. Затем, медленно открывая кран 11, установить расход воды через контур при котором минимальная разность уровней жидкости в каких-либо двух соседних пьезометрах станет равной не менее 2-5 мм вод. ст. Проверить, что идет слив воды через переливную трубу 4. При необходимости увеличить подачу воды из водопровода больше открыть кран 2. При установившемся режиме измерить уровни жидкости в пьезометрах, расход воды с помощью мерной емкости 12 и температуру воды термометром (в приёмном баке 13). Занести результаты измерений в таблицу 2.

Далее, последовательно увеличивая расход через контур открытием крана 11, аналогичным образом проводятся измерения при разных расходах, вплоть до максимально возможного. Всего выполняется от 3-х до 6-ти опытных измерений.

После завершения измерений перекрыть кран 2 на водопроводе.

## Обработка опытных данных

Для каждого опытного измерения производятся вычисления в следующем порядке.

### 1. Расход воды

$$Q = V / \tau, \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $V$  – количество воды, поступившей в мерную емкость,  $\text{м}^3$ ;  $\tau$  – время заполнения мерной емкости, с.

### 2. Определяющая (минимальная) для местных сопротивлений контура скорость движения воды

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

где  $d$  – внутренний диаметр малой трубы контура, м.

### 3. Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{w\rho d}{\mu},$$

где  $\rho$  – плотность и  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости воды при измеренной температуре.

### 4. Коэффициент местных сопротивлений:

$$\text{резкое расширение трубы} \quad \xi_1 = (h_1 - h_2) \frac{2g}{w^2};$$

$$\text{резкое сужение трубы} \quad \xi_2 = (h_2 - h_3) \frac{2g}{w^2};$$

$$\text{колесо без закругления} \quad \xi_3 = (h_3 - h_4) \frac{2g}{w^2};$$

$$\text{колесо с закруглением} \quad \xi_4 = (h_4 - h_5) \frac{2g}{w^2};$$

$$\text{кран пробковый} \quad \xi_5 = (h_5 - h_6) \frac{2g}{w^2};$$

$$\text{вентиль нормальный} \quad \xi_6 = (h_6 - h_7) \frac{2g}{w^2},$$

где  $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7$  – измеренные уровни воды в пьезометрах с соответствующими номерами на стенде. Размерность  $h_i$  – м вод. ст.

Наряду с местными сопротивлениями в контуре проявляется и сопротивление трения. Потеря напора потока, обусловлена трением, в коротком контуре сравнительно мала и для упрощения вычисления коэффициентов  $\xi$  здесь не учитывается. Полученные опытные значения коэффициентов  $\xi$  заносятся в табл. 3.2. Они сравниваются с рассчитанными по формулам (3.2) и (3.3) и табличными значениями (табл. 3.1). При различиях расчётных и опытных значений  $\xi_i$  анализируются возможные причины расхождения.

Таблица 3.2

Результаты измерений и сравнение значений  $\xi$ 

| № опыта                                | Показания пьезометров,<br>м вод. ст. |       |       |       |       |       |       | $\tau$ ,<br>с | $Q$ ,<br>$\text{м}^3/\text{с}$ | $w$ ,<br>$\text{м}/\text{с}$ | $Re$ | Опытные значения<br>коэффициента местных<br>сопротивлений |         |         |         |         |         |
|----------------------------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|--------------------------------|------------------------------|------|-----------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                        | $h_1$                                | $h_2$ | $h_3$ | $h_4$ | $h_5$ | $h_6$ | $h_7$ |               |                                |                              |      | $\xi_1$                                                   | $\xi_2$ | $\xi_3$ | $\xi_4$ | $\xi_5$ | $\xi_6$ |
| 1                                      |                                      |       |       |       |       |       |       |               |                                |                              |      |                                                           |         |         |         |         |         |
| 2                                      |                                      |       |       |       |       |       |       |               |                                |                              |      |                                                           |         |         |         |         |         |
| 3                                      |                                      |       |       |       |       |       |       |               |                                |                              |      |                                                           |         |         |         |         |         |
| ...                                    |                                      |       |       |       |       |       |       |               |                                |                              |      |                                                           |         |         |         |         |         |
| Расчетные и табличные значения $\xi$ : |                                      |       |       |       |       |       |       |               |                                |                              |      |                                                           |         |         |         |         |         |

**Контрольные вопросы**

1. В какую форму переходит механическая энергия потока, теряемая при движении?
2. Чем обусловлены местные сопротивления?
3. Как вычисляются потери напора на преодоление местных сопротивлений?
4. Как меняются скорость и давление потока при его внезапном расширении?
5. Почему уровень воды в расходном баке должен поддерживаться постоянным при проведении опыта?
6. Какая скорость в местном сопротивлении используется в уравнении Вейсбаха для потери напора потока?
7. Для каких целей измеряется температура жидкости в опытах?
8. Как определяются местные потери напора потока по опытными данным?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ

### Общие положения и цель работы

*Цель работы:* опытное определение коэффициентов скорости  $\varphi$ , расхода  $\mu$ , сжатия струи  $\epsilon$  и местного сопротивления  $\xi$  при истечении жидкости через отверстия и насадки, при полном совершенном сжатии.

Для нахождения расхода и скорости при истечении через малое отверстие в тонкой стенке при постоянном напоре составляется уравнение Л. Бернулли для сечений I-I и II-II и плоскости сравнения 0-0 (см. рис. 4.1).

Сечение I-I принимается по поверхности жидкости в резервуаре. Сечение струи II-II называется сжатым сечением. Опыты показывают, что за счёт боковой скорости подхода жидкости происходит сжатие струи. Наибольшее сжатие струи происходит после отверстия, примерно на расстоянии половины диаметра отверстия.

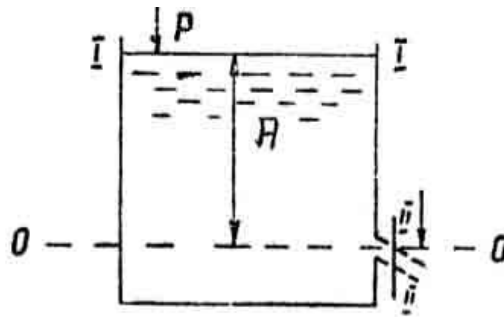


Рис. 4.1. К составлению уравнения Бернулли

Плоскость сравнения проходит через центр отверстия.

Тогда для этих сечений уравнение Д. Бернулли запишется

$$H = \frac{V^2}{2g} + h_{1-2}$$

Учитывая, что  $h_{1-2} = \zeta \frac{V^2}{2g}$ , получим:

$$H = \frac{V^2}{2g} (1 + \zeta).$$

Решая относительно средней скорости

$$V = \sqrt{\frac{2gH}{1+\zeta}} = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta}} \sqrt{2gH},$$

обозначая

$$\frac{1}{\sqrt{1+\zeta}} = \varphi,$$

получаем основную расчётную формулу:

$$V = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (4.1)$$

где  $\varphi$  - коэффициент скорости;  $h_{1-2}$  – потери напора между сечениями I-I и II-II;  $V$  – скорость;  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления;  $H$  – напор.

Физическую суть коэффициента скорости можно увидеть из выражения (4.1):

$$\varphi = \frac{V}{\sqrt{2gH}} = \frac{V}{V_T},$$

т.е. коэффициент скорости представляет собой отношение скорости действительной к скорости теоретической, ибо  $V_T = \sqrt{2gH}$  – скорость истечения «идеальной жидкости».

Для нахождения расхода умножим скорость, полученную (4.1), на площадь сечения II – II, то есть на площадь сжатого сечения струи

$$Q = \omega_{ст} \varphi \sqrt{2gH}, \quad (4.2)$$

Однако  $\omega_{ст}$  нам неизвестна, поэтому вводим коэффициент сжатия струи

$$\varepsilon = \frac{\omega_{ст}}{\omega},$$

который представляет собой отношение площади сжатого сечения струи к площади отверстия.

Тогда  $\omega_{ст} = \varepsilon \omega$ .

Заменяя в выражении (4.2)  $\omega_{ст}$  через  $\varepsilon \omega$ , получим

$$Q = \varepsilon \omega \varphi \sqrt{2gH}.$$

Вводим обозначение  $\varepsilon \varphi = \mu$ ,

тогда окончательно получаем

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}, \quad (4.3)$$

$\mu$  - коэффициент расхода.

Из выражения (4.3) находим  $\mu$

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}} = \frac{Q_d}{Q_T},$$

т.е. коэффициент расхода при истечении – это отношение действительного расхода к теоретическому.

Формулы (4.1) и (4.3) являются основными расчётными формулами для определения скорости и расхода при истечении жидкости через отверстия и насадки.

Коэффициенты  $\mu$  и  $\varphi$  определяются экспериментально или берутся из справочников в зависимости от геометрии отверстия или насадки и, как показали последние исследования, от числа Рейнольдса, которое следует определять по формуле:

$$Re = \frac{\sqrt{2gH}d}{\nu}.$$

## Описание лабораторной установки

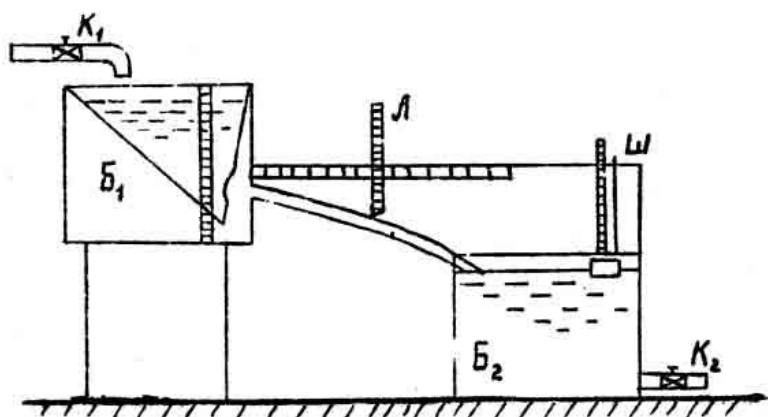


Рис. 4.2. Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки показана на рис. 4.2.

Вода из водопровода поступает в бак Б<sub>1</sub> и расход ее регулируется краном К<sub>1</sub>. В боковой стенке напорного бака, обращенной к мерному баку Б<sub>2</sub>, имеется отверстие, через которое происходит истечение. Конструкция прибора позволяет менять

геометрию отверстия или заменить отверстие насадкой. Отверстие закрывается при помощи резиновой шторки, укрепленной на оси вверху бака и прижимаемой к стенке при помощи груза или давления воды.

Оттягивание шторки от стенки бака (открытие отверстия) производится при помощи перекинутого через блок на крышке бака Б<sub>1</sub> тросика. На боковой стенке напорного бака установлен пьезометр П, по которому отсчитывается напор над центром отверстия.

Для определения координат точек оси струи между напорными и мерными баками установлено устройство, состоящее из двух линеек: вертикальной (для измерения координаты у) и горизонтальной (для измерения координаты х).

Вытекающая струя попадает в мерный бак, на крышке которого установлена шкала Ш, показывающая объем воды, поступающей в бак. Вода из мерного бака спускается по сливной трубке в канализацию открытием вентиля К<sub>2</sub>.

### Порядок проведения работы

#### А. Определение коэффициента расхода.

Для определения коэффициента расхода  $\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}$ , необходимо знать расход, напор над центром отверстия Н и диаметр d отверстия, так как

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Диаметр отверстия указан на установке, в случае наличия насадка его данные выбиты на нем.

Напор над центром отверстия определяется по пьезометру, установленному на напорном баке, и поддерживается на определенном уровне с помощью крана К<sub>1</sub>. (Величина напора каждый раз задается преподавателем).

Расход определяется объемным способом, для этого закрывают сливной вентиль К<sub>2</sub> сборного резервуара установки. Вся вода в этом случае

собирается в сборном резервуаре, снабженном поплавковым устройством, по которому можно знать сколько в данный момент находится жидкости в резервуаре.

По мере истечения количество жидкости будет увеличиваться. Замерив в какой-то момент времени начальный объем жидкости  $W_1$ , включают секундомер и, набрав 3-5 литров, измеряют время, в течение которого набралось это количество воды. Тогда расход можно определить так:

$$Q = \frac{W_2 - W_1}{t},$$

где  $W_1$  – объем жидкости в начале наблюдения;  $W_2$  – объем жидкости в конце наблюдения;  $t$  – время, в течение которого вытек объем.

Затем вычисляют коэффициент расхода:

$$\mu = \frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2gH}}.$$

Определение коэффициента скорости.

Существует два способа определения коэффициента скорости.

Если прибор оснащен измерителем, с помощью которого можно измерить площадь сжатого сечения струи, то измеряют ее.

Так как струя в сжатом сечении имеет форму эллипса, измеряют оси эллипса  $a$  и  $b$ .

Затем вычисляют  $\varepsilon = \frac{\omega_{ст}}{\omega} = \frac{\frac{\pi ab}{4}}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{ab}{d^2}$  и  $\varphi = \frac{\mu}{\varepsilon}$ .

При нахождении коэффициента скорости  $\varphi$  погрешность измерения в десятые доли миллиметра дает существенные ошибки, т.к. измерения производятся с помощью микрометров.

Кроме того, этот способ непригоден для нахождения коэффициентов  $\varepsilon$  и  $\varphi$  для насадков.

#### 1. По измерению координат струи (рис. 4.3)

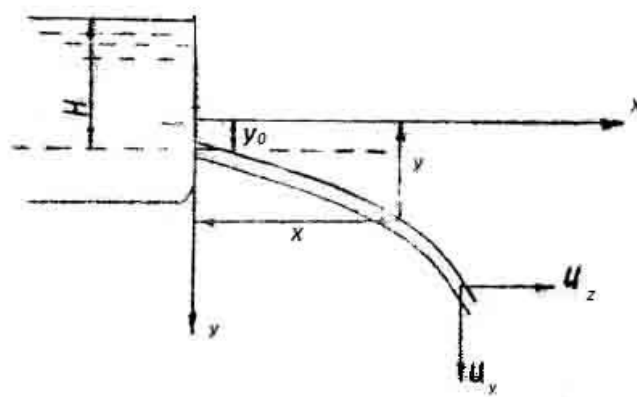


Рис. 4.1. Измерение координат струи

Координата  $x$  должна обязательно отсчитываться от плоскости отверстия,  $y$  – может отсчитываться от любого уровня, тогда:

$$\begin{aligned}
 U_x &= \varphi \sqrt{2gH} \\
 U_y &= gt \\
 X = U_x t &= \varphi t \sqrt{2gH} \\
 Y = U_y &= \frac{gt^2}{2}
 \end{aligned}$$

Уравнение траектории есть уравнение параболы:

$$y = \frac{g}{2} \frac{x^2}{\varphi^2 g H} = \frac{x^2}{4\varphi^2 H}$$

или

$$y - y_0 = \frac{x^2}{4\varphi^2 H}.$$

По этому способу обычно берут два значения  $x$  и  $y$  и находят  $\varphi$  по:

$$\varphi = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{1}{yH}} = \frac{x}{2\sqrt{yH}}.$$

Взяв другую пару  $x$  и  $y$ , получают другое значение  $\varphi$ , т.е. имеет место разброс из-за погрешностей в измерениях.

Для исключения погрешностей линеаризируем уравнение траектории струи, вводя новые координаты  $Y = y$ ,  $X = x^2$ .

Получаем линеаризованное уравнение траектории

$$Y = Y_0 + \frac{X}{4H\varphi^2}.$$

В новой системе координат траектория струи будет представляться прямой линией (рис. 4.4).

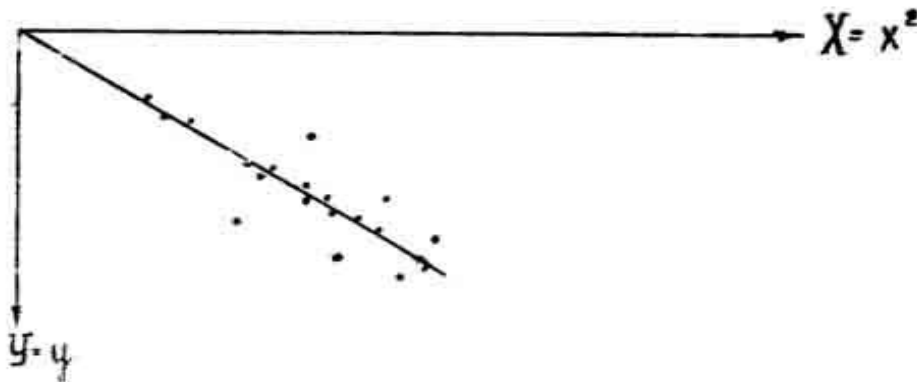


Рис. 2.4. Линеаризация траектории струи

Рис. 4.4 наглядно показывает ошибочные измерения, которые следует исключать при последующей обработке. Точки экспериментов должны ложиться около прямой.

Используя способ наименьших квадратов (необходимо для исключения ошибок провести не менее 20 измерений  $x$  и  $y$ ), получим:

$$\frac{1}{4H\varphi^2} \sum X_i^2 + Y_0 \sum X_i = \sum X_i Y_i.$$

$$\frac{1}{4H\varphi^2} \sum X_i + iY_0 = \sum Y_i$$

или

$$\frac{1}{4H\varphi^2} \sum x_i^4 - y_0 \sum x_i^2 = - \sum x_i^2 y_i$$

$$\frac{1}{4H\varphi^2} \sum x_i^2 + i y_0 = \sum y_i.$$

Решая систему относительно  $\varphi$ , получим:

$$\varphi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{i \sum x_i^4 - (\sum x_i^2)^2}{H(\sum x_i^2 \sum y_i - i \sum x_i^2 y_i)}}, \quad (4.4)$$

где  $i$  – число измерений пар  $x$  и  $y$  не менее 20;

$H$  – напор над центром отверстия из насадка.

Составление отчета по лабораторной работе.

В отчете по лабораторной работе необходимо представить схему установки, формы отчетных листов и вычисленные значения коэффициентов расхода  $\mu$ , скорости  $\varphi$ , сжатия струи  $\varepsilon$  и местного сопротивления  $\zeta$ .

Для определения коэффициентов расхода отверстий и насадков, необходимо составить форму отчетного листа по табл. 1.

Таблица 4.1

| № опыта | Наименования отверстий или насадки, эскиз с размерами | $W_1$ ,<br>см <sup>3</sup> | $W_2$ ,<br>см <sup>3</sup> | $t$ ,<br>с | $H$ ,<br>см | $W = W_2 - W_1$ ,<br>см | $Q = \frac{W}{t}$ ,<br>см <sup>3</sup> /с | $\mu = \frac{Q}{\sqrt{2gH}}$ |
|---------|-------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------|-------------|-------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|
|         |                                                       |                            |                            |            |             |                         |                                           |                              |

Коэффициент скорости определяется только для одного отверстия или насадка, заданного преподавателем. Результаты измерений и вычислений следует занести в форму отчетного листа в табл. 4.2.

Таблица 4.2

| № опыта | $x$ , см | $y$ , см | $x^2$ , см <sup>2</sup> | $x^2 y$ , см <sup>3</sup> | $x^4$ , см <sup>4</sup> |
|---------|----------|----------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1       |          |          |                         |                           |                         |
| 2       |          |          |                         |                           |                         |
| ...     |          |          |                         |                           |                         |
| ...     |          |          |                         |                           |                         |
| ...     |          |          |                         |                           |                         |
| 20      |          |          |                         |                           |                         |

Затем по формуле (4.4) вычисляем коэффициент  $\varphi$ .

Коэффициент сжатия струи из ранее обозначенного  $\varepsilon \varphi = \mu$  находим:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\varphi}$$

И коэффициент местного сопротивления  $\zeta$ :

$$\zeta = \frac{1}{\varphi^2} - 1$$

Для данного отверстия и насадка следует полученные коэффициенты свести в следующую табл.4.3.

Таблица 4.3

| Коэффициенты         | $\mu$ | $\varphi$ | $\varepsilon$ | $\zeta$ |
|----------------------|-------|-----------|---------------|---------|
| По справочным данным |       |           |               |         |
| По опыту             |       |           |               |         |

Для отверстия в тонкой стенке по справочным данным:

$$\mu = 0,62, \varphi = 0,97, \varepsilon = 0,54, \zeta = 0,06.$$

### ***Контрольные вопросы***

1. Когда отверстие считается малым?
2. Какая стенка называется тонкой?
3. По какой формуле определяется теоретическая скорость истечения жидкости через малое отверстие в тонкой стенке?
4. По какой формуле определяется действительная скорость истечения через малое отверстие в тонкой стенке?
5. По какой формуле определяется в процессе выполнения данной работы действительный расход жидкости, вытекающей из отверстия?
6. По какой формуле определяется теоретический расход жидкости при истечении через отверстие?
7. Что называется коэффициентом сжатия струи?
8. По какой формуле определяется коэффициент местного сопротивления при входе в отверстие?
9. Какие потери учитываются при изучении истечения жидкости через малое отверстие?
10. Укажите уравнение Бернулли для потока реальной жидкости.
11. От каких факторов зависит кинематический коэффициент вязкости?
12. Укажите уравнение непрерывности жидкости.
13. Как изменится скорость истечения жидкости из отверстия в тонкой стенке, если напор увеличить в 4 раза?
14. Как изменится расход при истечении жидкости из отверстия в тонкой стенке, если диаметр отверстия увеличить в 2 раза?
15. Как изменится скорость при истечении жидкости из отверстия в тонкой стенке, если напор уменьшить в 4 раза?

## Лабораторная работа № 5 Осаждение твёрдых частиц под действием силы тяжести

### *Общие положения и цель работы*

*Цель работы:* ознакомиться с методами расчета скорости осаждения под действием силы тяжести и экспериментально проверить результаты расчета.

Проведение ряда процессов химической технологии связано с движением твердых тел в капельных жидкостях и газах. К таким процессам относятся осаждение частиц из суспензий и пылей под действием инерционных или центробежных сил, механическое перемешивание в жидких средах и другие. Изучение закономерностей этих процессов составляет внешнюю задачу гидродинамики.

На твердую частицу, осаждающуюся под действием силы тяжести, действуют следующие силы: сила тяжести, выталкивающая архимедова сила и сила сопротивления среды. Основная трудность расчета скорости осаждения заключается в том, что сила сопротивления среды зависит от режима движения частицы, а следовательно, и от скорости осаждения:

$$R = \varphi \cdot F \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}, \quad (5.1)$$

где  $F$ - площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению его движения,  $\text{м}^2$ ;

$\rho$ - плотность среды,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\omega$ - скорость осаждения,  $\text{м/с}$ ;

$\varphi$ - коэффициент сопротивления среды, зависящий от режима движения.

При ламинарном движении, наблюдающемся при небольших скоростях и малых размерах тел или при высокой вязкости среды, тело окружено пограничным слоем жидкости и плавно обтекается потоком. Сопротивление среды в таких условиях обусловлено преодолением лишь сил внутреннего трения и описывается законом Стокса:

$$\varphi = \frac{24}{\text{Re}}. \quad (5.2)$$

С развитием турбулентности потока (например, с увеличением скорости движения тела и его размеров) все большую роль начинают играть силы инерции. Под действием этих сил пограничный слой отрывается от поверхности тела, что приводит к образованию зоны беспорядочных завихрений за движущимся телом и понижению давления в этой зоне. При этом разность давлений в лобовой и корковой частях обтекаемого тела резко возрастает. При  $\text{Re} > 500$  роль лобового сопротивления становится преобладающей, а сопротивлением трения можно практически пренебречь. Режим осаждения становится автомодельным по отношению к критерию Рейнольдса, т.е. коэффициент сопротивления среды  $\varphi$  не зависит от критерия

$Re$ . При  $500 < Re < 2 \cdot 10^5$  сопротивлений среды описывается квадратичным законом сопротивление Ньютона:

$$\varphi = 0,44 = const. \quad (5.3)$$

При переходном режиме осаждения, когда  $2 \leq Re \leq 500$ , силы трения и силы инерции соизмеримы и ни одной из них пренебрегать нельзя. В этой области сопротивление среды описывается промежуточным законом:

$$\varphi = \frac{18.5}{Re^{0.6}}. \quad (5.4)$$

При движении тела в жидкости его скорость будет возрастать до тех пор, пока сила сопротивления среды не уравновесит тела за вычетом выталкивающей силы. Далее движение частицы происходит по инерции с постоянной скоростью, которая называется скоростью осаждения.

1. Из уравнения баланса сил действующих на осажденную частицу, получим выражение для расчета скорости осаждения:

$$\omega = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{d \cdot (\rho_q - \rho_c) \cdot g}{\varphi \cdot \rho}}, \quad (5.5)$$

где  $\rho_q$  - плотность твердой частицы,  $кг/м^3$ ;  $g$  - ускорение силы тяжести,  $м/с^2$ .

Подробно вывод уравнения (5.5) изучить по [1,2,3].

При расчете скорости осаждения по уравнению (5.5) пользуются методом последовательных приближений, и расчеты выполняются в следующей последовательности:

- 1) задаются произвольным значением критерия  $Re$ ;
- 2) по одному из уравнений (5.3)-(5.4) рассчитывают коэффициент сопротивления среды  $\varphi$ ;
- 3) по уравнению (5.5) определяют скорость осаждения;
- 4) определяют величину критерия  $Re$ ;

$$Re = \frac{\omega \cdot d \cdot \rho_c}{\mu};$$

5) определяют погрешность:

$$\Delta = \frac{(Re_{зад} - Re_{выч})}{Re_{зад}};$$

6) если  $\Delta > 0.03$ , то задаются новым значением критерия  $Re_{зад} = Re_{зад} \cdot (1 - \Delta)$  и весь расчет повторяется заново;

7) расчеты проводятся до тех пор, пока  $\Delta \leq 0.03$ .

Уравнение (5) является наиболее точным, но неудобно для практического пользования.

2. Вследствие трудоемкости метода последовательных приближений более удобно для определения скорости осаждения пользоваться методом,

предложенным П.В. Лященко. Этот метод основан на преобразовании уравнения (5.5) к критериальному виду:  $Re = f(Ar)$ . Подробно вывод критериальных уравнений вида  $Re = f(Ar)$  можно изучить по [1, 2, 3].

В результате преобразования уравнения (5.5) получены следующие расчетные зависимости:

для ламинарного режима осаждения при  $Ar \leq 36$ :

$$Re = \frac{Ar}{18}; \quad (5.6)$$

для переходного режима осаждения при  $36 < Ar \leq 83000$ :

$$Re = \left( \frac{Ar}{13.9} \right)^{\frac{1}{1.4}} = 0.152 \cdot Ar^{0.715}; \quad (5.7)$$

для турбулентного режима осаждения при  $Ar > 83000$ :

$$Re = 1.74 \sqrt{Ar}; \quad (5.8)$$

где  $A_r$  - критерий Архимеда  $A_r = \frac{d^3 \cdot (\rho_q - \rho_c) \cdot \rho_c \cdot g}{\mu^2}$ .

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

- 1) определяется величина критерия Архимеда;
- 2) по найденному значению критерия Архимеда определяется режим осаждения;
- 3) по одному из уравнений (5.6)-(5.8) определяется величина критерия Рейнольдса;
- 4) рассчитывается скорость осаждения:

$$\omega = \frac{Re \cdot \mu}{d \cdot \rho}.$$

3. Для приближенных расчетов можно использовать единую интерполяционную зависимость объединяющую уравнения (5.6)-(5.8) и справедливую для всех режимов осаждения:

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0.575 \cdot \sqrt{Ar}}. \quad (5.9)$$

4. Для расчета скорости осаждения используется обобщенный графоаналитический метод, пригодный при любом режиме осаждения. При этом используется критериальная зависимость вида:  $L_y = f(Ar)$ , где  $L_y$  - критерий Лященко

$$L_y = \frac{Re^2}{A_r} = \frac{\omega^3 \cdot \rho_c^2}{\mu \cdot (\rho_q - \rho_c) \cdot g}. \quad (5.10)$$

Определение скорости осаждения производят следующим образом:

- 1) определяют критерий Архимеда;
- 2) по найденному значению критерия  $Ar$ , по рис. 1 определяют величину критерия  $Ly$ ;
- 3) вычисляют скорость осаждения:

$$\omega = \sqrt[3]{\frac{Ly \cdot \mu \cdot (\rho_q - \rho_c) \cdot g}{\rho_c^2}} . \quad (5.11)$$

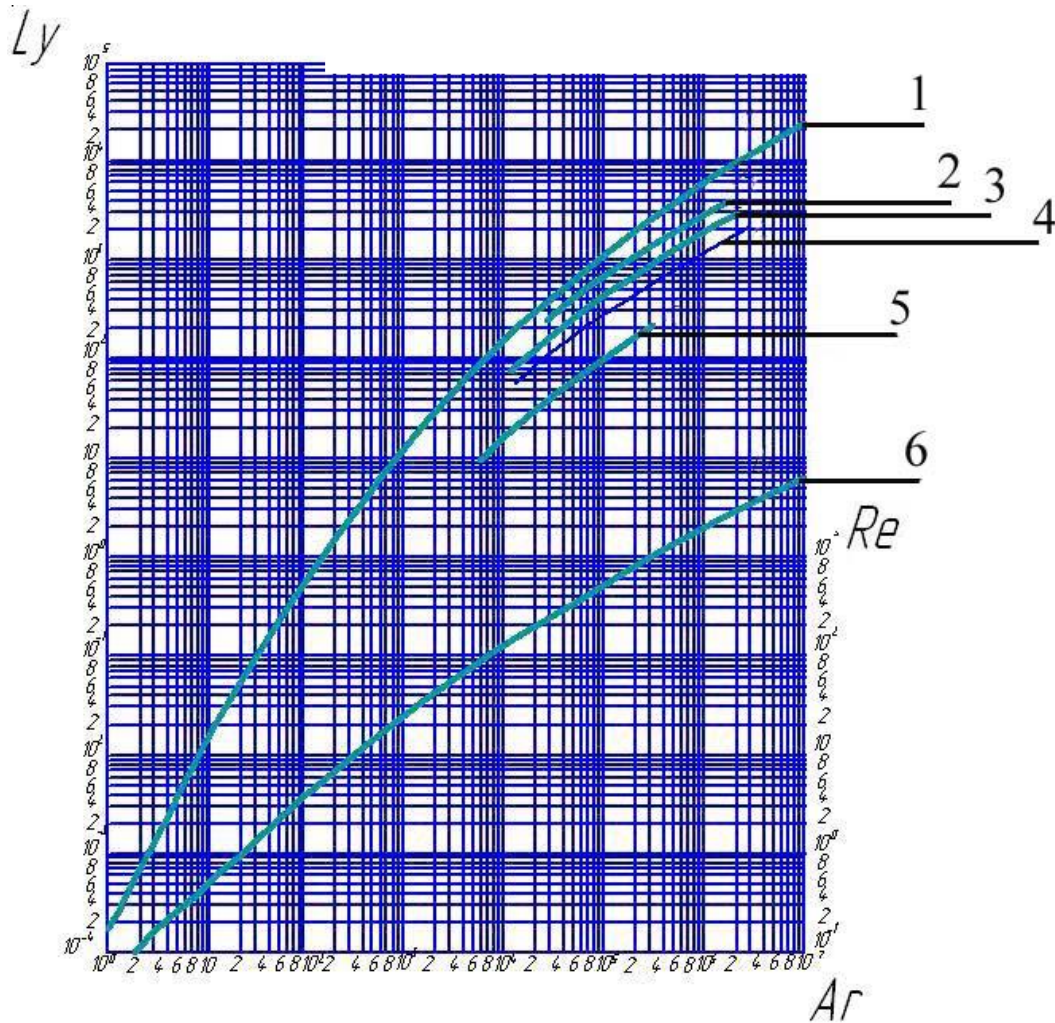


Рис.5.1 Зависимость критериев Лященко и Рейнольдса от критерия Архимеда для осаждения одиночной частицы в неподвижной среде: 1-шарообразные частицы; 2-округленные; 3- угловатые; 4-продолговатые; 5- пластинчатые.

### Методика эксперимента

Экспериментальная установка состоит из трех вертикальных цилиндров 1 (рис.5.2), в которых находятся жидкости с различными физическими свойствами.

Цилиндры закреплены между нижним 9 и верхним 10 основаниями. В верхнем основании имеется паз, в котором перемещается подвижная пластина 3. Сверху подвижная пластина накрыта неподвижной пластиной 2.

Подвижная пластина совершает возвратно поступательное движение под действием втягивающего реле 4, которое включается при нажатии кнопки 7 и возвращается в исходное положение при ее отпускании. Кнопка 7 одновременно служит для управления электросекундометром 5. При нажатии кнопки секундомер включается, а при её отпускании останавливается. Сброс показаний секундомера осуществляется рукояткой 6.

Испытуемая частица 8 помещается в одно из отверстий неподвижной пластины 2.

Путь пройденный частицей измеряется линейкой 11 с точностью  $\pm 0.5$  мм, время осаждения измеряется секундомером 5 с точность до  $\pm 0.5$  с. Скорость осаждения рассчитывается по формуле:

$$\omega = \frac{L}{t}.$$

Для исключения систематической ошибки измерений при измерении времени осаждения глаз наблюдателя должен находиться на уровне нижнего основания.

Эквивалентный диаметр частиц неправильной формы определяется по формуле:

$$d_{\text{экв}} = 1.24 \cdot \sqrt[3]{\frac{M}{\rho_m}}$$

где М- масса частицы, кг.

Масса частицы определяется путем пятикратного взвешивания 10-20 г на аналитических весах.

### ***Требования безопасности труда***

При работе требуется следить, чтобы все подводы и подключения электросекундомера и втягивающего реле были тщательно изолированы. Запрещается работать при снятом защитном кожухе втягивающего реле.

### ***Порядок выполнения работы***

1. Производят подготовку установки к выполнению опыта. При необходимости в цилиндры доливают соответствующие жидкости так, чтобы их уровень достигал верхнего основания.

2. Получают у преподавателя или лаборанта испытуемые частицы и определяют их эквивалентный диаметр.

3. Испытуемая частица помещается в одно из отверстий верхней неподвижной пластины.

4. Нажимают кнопку 7 (рис. 5.2). При этом включается втягивающее реле, подвижная пластина перемещается, отверстия в неподвижной и подвижной пластинах и верхнем основании совпадают, и испытуемая

частица проваливается в цилиндр с жидкостью и начинает осаждаться. Одновременно включается электросекундомер 5.

5. Кнопку 7 держат нажатой до тех пор, пока частица не достигнет дна сосуда. В момент касания частицей дна кнопку отпускают. При этом секундомер останавливается.

6. Время осаждения и путь, пройденный частицей, заносят в журнал наблюдений.

7. Каждый опыт повторяют 5-6 раз.

8. Результаты измерений заносят в табл. 5.1.

Таблица 5.1

| № п/п | Эквивалентный диаметр частицы $d, \text{м}$ | Плотность частицы $\rho_{\text{ч}}, \text{кг/м}^3$ | Плотность жидкости $\rho_{\text{с}}, \text{кг/м}^3$ | Вязкость жидкости $\mu, \text{н} \cdot \text{с/м}^2$ | Путь, пройденный частицей, $L, \text{м}$ | Время осаждения $t, \text{с}$ | Скорость осаждения $\omega, \text{м/с}$ |
|-------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|
|       |                                             |                                                    |                                                     |                                                      |                                          |                               |                                         |

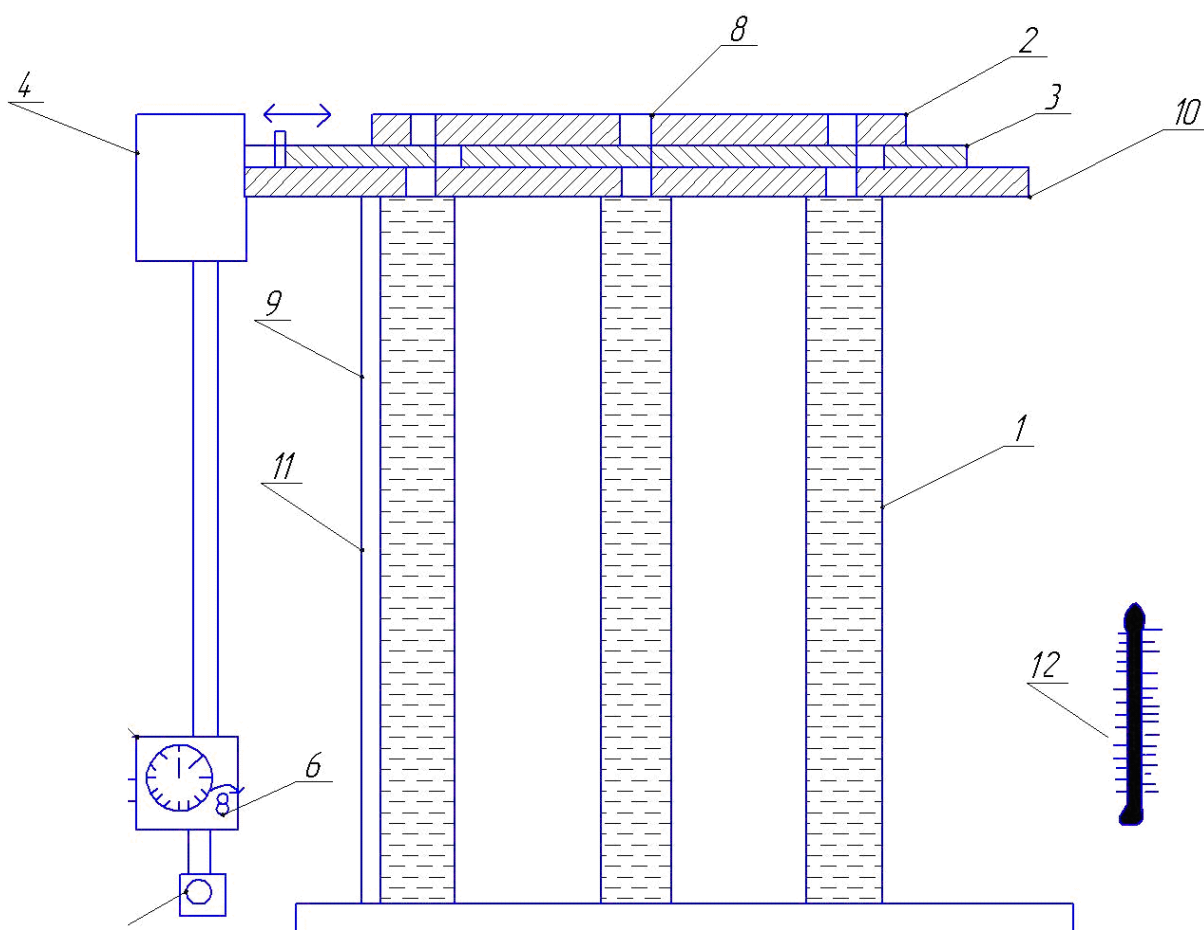


Рис.5.2. Схема экспериментальной установки:

- 1 – цилиндр с жидкостью, 2 – неподвижная пластина, 3 – подвижная пластина,  
 4 – втягивающее реле, 5 – электросекундомер, 6 – ручка сброса, 7 – кнопка,  
 8 – испытываемая частица, 9 – нижнее основание, 10 – верхнее основание,  
 11 – линейка, 12 – термометр

9. Производят расчет скорости осаждения:
- а) по уравнению (5.5);
  - б) по методу П.В. Лященко, по уравнениям (5.6)- (5.8);
  - в) по интерполяционному уравнению (5.9);
  - г) графоаналитическим методом.
10. Сравнивают результаты расчета с данными эксперимента и делают выводы о точности и трудоемкости каждого метода расчета.
11. Результаты расчета сводят в табл. 5.2.

Таблица 5.2

| Средняя скорость осаждения и доверительные грани | По ур-нию (5.5) |            | По ур-ням (5.6)-(5.8) |            | По ур-нию (5.9) |            | По ур-нию (5.11) |            |
|--------------------------------------------------|-----------------|------------|-----------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|
|                                                  | $\omega_1$      | отклонение | $\omega_2$            | отклонение | $\omega_3$      | отклонение | $\omega_4$       | отклонение |
|                                                  |                 |            |                       |            |                 |            |                  |            |

### ***Обработка результатов эксперимента***

Для повышения надежности экспериментальных данных и оценки погрешности измерений экспериментальное определение скорости осаждения необходимо повторить 5-7 раз одной и той же частицей.

Предварительные эксперименты показали, что при достаточно большом числе измерений экспериментальное значение скорости осаждения подчиняется нормальному закону распределения. Поэтому оценку точности произведем путем определения оценок и доверительных границ для параметров нормативного распределения по ГОСТ.11.004-94.

Несмещенной для генерального среднего нормального распределения является выборочное среднее (среднеарифметическое), определяемое по формуле:

$$X = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i, \quad (5.12)$$

где  $X_i$  - совокупность наблюдаемых значений случайной величины (скорость осаждения);

$n$  - объем выборки (число измерений).

Среднеквадратичная погрешность измерения:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}. \quad (5.13)$$

Несмещенная оценка для среднего квадратичного отклонения:

$$S_1 = M_k \cdot S. \quad (5.14)$$

Значение коэффициента  $M_k$  определяется по табл. 5.3 в зависимости от числа измерений  $K=n-1$ .

Таблица 5.3

| Число измерений | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Коэффициент М   | 1.253 | 1.258 | 1.085 | 1.064 | 1.051 | 1.042 | 1.036 | 1.032 | 1.028 | 1.025 |

Несмещенная оценка для дисперсии нормального распределения:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2. \quad (5.15)$$

Нижняя доверительная граница для генерального среднего:

$$a_n = \bar{X} - \frac{t_\gamma \cdot S}{\sqrt{n}}. \quad (5.16)$$

Верхняя доверительная граница для генерального среднего:

$$a_b = \bar{X} + \frac{t_\gamma \cdot S}{\sqrt{n}}; \quad (5.17)$$

где  $t_\gamma$  - квантиль распределения Стьюдента для доверительной вероятности (определяется по табл. 5.4).

Таблица 5.4

| K= n-1 | Значение коэффициентов $t_\gamma$ при доверительной вероятности $\gamma$ |       |       |
|--------|--------------------------------------------------------------------------|-------|-------|
|        | 0.90                                                                     | 0.95  | 0.99  |
| 1      | 3.078                                                                    | 6.315 | 31.82 |
| 2      | 1.886                                                                    | 2.920 | 6.965 |
| 3      | 1.638                                                                    | 2.353 | 4.541 |
| 4      | 1.533                                                                    | 2.132 | 3.747 |
| 5      | 1.476                                                                    | 2.015 | 3.365 |
| 6      | 1.440                                                                    | 1.943 | 3.143 |
| 7      | 1.415                                                                    | 1.895 | 2.998 |
| 8      | 1.397                                                                    | 1.859 | 2.896 |
| 9      | 1.383                                                                    | 1.833 | 2.821 |
| 10     | 1.372                                                                    | 1.812 | 2.764 |

Абсолютная погрешность измерения:

$$\varepsilon = \frac{t_\gamma \cdot S}{\sqrt{n}}.$$

Относительная погрешность измерений:

$$\Delta = \pm \frac{\varepsilon}{X} \quad (5.18)$$

Нижняя доверительная граница для среднего квадратичного отклонения:

$$\sigma_n = Z_n \cdot S; \quad (5.19)$$

где,  $Z_n = \frac{\sqrt{2K}}{\sqrt{2K-1} + U_\gamma}$ .

Верхняя доверительная граница для среднего квадратичного отклонения:

$$\sigma_e = Z_e \cdot S; \quad (5.20)$$

где,  $Z_e = \frac{\sqrt{2K}}{\sqrt{2K-1} + U_\gamma}$ .

Значения  $U_\gamma$  находятся по заданному значению доверительной вероятности  $\gamma$ :  
Таблица 5.5

|            |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|
| $\gamma$   | 0.90  | 0.95  | 0.99  |
| $U_\gamma$ | 1.282 | 1.645 | 2.326 |

### ***Содержание и оформление отчета о работе***

Отчет о работе оформляется в тетради. Он должен содержать:

- 1) название лабораторной работы;
- 2) формулировку цели работы;
- 3) основные понятия, определения и расчетные формулы;
- 4) схему установки;
- 5) результаты наблюдений, сведенные в таблицу;
- 6) все промежуточные расчеты;
- 7) структурную схему расчета скорости осаждения;
- 8) распечатку расчета скорости осаждения на ЭВМ;
- 9) таблицу сравнения расчетных и экспериментальных данных;
- 10) анализ полученных результатов и выводы.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что называется скоростью осаждения?
2. Дайте качественное и количественное описание режимов осаждения?

3. Какие силы определяют сопротивление среды при ламинарном режиме осаждения?

4. Какие силы определяют сопротивление среды при турбулентном режиме осаждения?

5. Опишите кинетику осаждения частицы под действием силы тяжести. Составьте уравнение баланса под действием сил действующих на частицу.

6. Как рассчитать скорость осаждения методом последовательных приближений?

7. Как рассчитать скорость осаждения по методу Лященко?

8. Как рассчитать скорость осаждения графоаналитическим методом?

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТ ФИЛЬТРАЦИИ

*Общие положения и цель работы*

**Цель работы:** ознакомиться с принципом и методами расчета процесса фильтрации, экспериментально определить константы фильтрации, сравнить экспериментальные и расчетные значения скорости фильтрации в начале и конце процесса.

Скоростью фильтрации называют объем фильтрата, получаемый в единицу времени с единицы поверхности фильтра:

$$C = \frac{dV}{Fd\tau}, \quad (6.1)$$

где,  $V$  - объем фильтрата,  $м^3$ ;

$F$  - поверхность фильтрования,  $м^2$ ;

$\tau$  - продолжительность фильтрования, с.

С кинетической точки зрения скорость любого процесса прямо пропорциональна движущей силе и обратно пропорциональна сопротивлению:

$$C = \frac{\Delta P}{\mu(R_{oc} + R_{nep})}, \quad (6.2)$$

где,  $\Delta P$  - разность давлений, Па;

$\mu$  - вязкость жидкой фазы суспензии,  $Н \cdot с / м^2$ ;

$R_{oc}$  - сопротивление слоя осадка,  $м^{-1}$ ;

$R_{nep}$  - сопротивление фильтровальной перегородки,  $м^{-1}$ .

Приравнивая правые части уравнений (6.1) и (6.2) и проводя преобразования, получим основное уравнение фильтрации:

$$\mu r X V dV + \mu F R_{nep} dV = \Delta P F^2 d\tau, \quad (6.3)$$

где,  $r$  - удельное объемное сопротивление слоя осадка,  $м^{-2}$ ;

$X$  - объем осадка, образующийся при получении 1  $м^3$  фильтрата,  $м^3 / м^3$ .

Задание граничных и начальных условий при интегрировании уравнения (3) зависит от способа проведения процесса фильтрации.

Уравнение фильтрации при постоянной разности давлений:

$$V^2 + 2 \frac{R_{nep} F}{r X} V = 2 \frac{\Delta P F^2}{\mu r X} \tau. \quad (6.4)$$

Уравнение фильтрации при постоянной скорости процесса:

$$V^2 + \frac{R_{nep} F}{r X} V = \frac{\Delta P F^2}{\mu r X} \tau. \quad (6.5)$$

Из уравнений (6.4) и (6.5), задаваясь толщиной слоя осадка, можно определить все величины, характеризующие процесс фильтрации, т.е. время фильтрации, удельную производительность, поверхность фильтрования. Однако мы не можем воспользоваться этими уравнениями, т.к. в них входят величины  $r$  и  $R_{nep}$ , которые не являются физическими константами и не поддаются аналитическому определению.

### Методика эксперимента

Предложено несколько различных методов расчета процесса фильтрации, но все они предусматривают экспериментальное определение тех или иных величин. Наибольшее распространение получил метод определения  $r$  и  $R_{nep}$  с помощью констант фильтрации. Для этого преобразуем уравнение (6.4) к виду:

$$\frac{\tau}{V} = \frac{\mu r X}{2\Delta P F^2} V + \frac{\mu R_{nep}}{\Delta P F}. \quad (6.6)$$

В координатах  $\frac{\tau}{V} - V$  уравнение (6.6) является уравнением прямой и имеет вид:

$$\frac{\tau}{V} = MV + K, \quad (6.6 \text{ а})$$

где,  $M$  - константа фильтрации, характеризующая удельное сопротивление слоя осадка,  $c / m^3$ :

$$M = \frac{\mu r X}{2\Delta P F^2};$$

$K$  - константа фильтрации, характеризующая сопротивление фильтровальной перегородки,  $c / m^3$ :  $K = \frac{\mu R_{nep}}{\Delta P F}.$

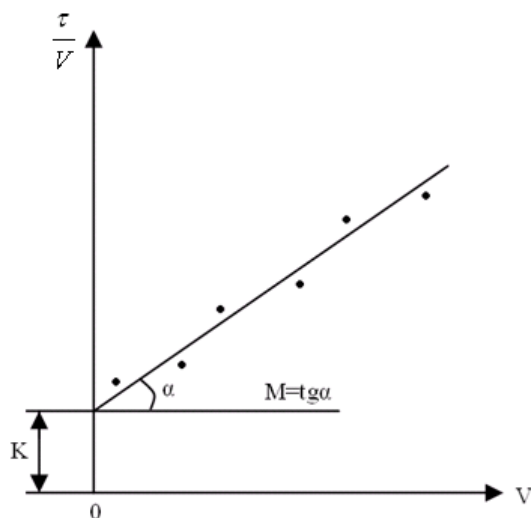


Рис.6.1. Зависимость  $\Delta \tau / \Delta v$  от  $v$ .

Константы  $M$  и  $K$  находят по графику  $\frac{\tau}{V} = f(V)$ , построенному по экспериментальным точкам,  $M$  равна тангенсу угла наклона этой прямой, а  $K$  - отрезку, отсекаемому этой прямой на оси ординат.

По найденным значениям  $M$  и  $K$  определяем удельное сопротивление слоя осадка и сопротивление фильтровальной перегородки:

$$r = \frac{2M\Delta PF^2}{\mu X} \quad (6.7)$$

$$R_{пер} = \frac{K\Delta PF}{\mu} \quad (6.8)$$

### ***Порядок выполнения работы***

Экспериментальная установка, представленная на рис.6.2, состоит из вакуум-филтра 1, емкости для суспензии 2 с мешалкой 10, мерника филтрат 4, предохранительной емкости 8 и вакуум-насоса 3. Время филтрации измеряется электросекундомером 12, который имеет два тумблера уравнения. Двухпозиционный тумблер служит для включения секундомера в сеть. Трехпозиционный тумблер в среднем положении производит остановку секундомера, в верхнем положении – пуск секундомера, в нижнем - сброс показаний и возврат стрелок секундомера в нулевое положение.

### ***Измерения проводятся в следующей последовательности:***

- 1) Подготовить фильтровальный элемент к работе, для чего тщательно промыть и просушить фильтровальную перегородку или заменить ее.
- 2) Если в мернике 4 и предохранительной емкости 8 остался филтрат, слить его в канализацию и закрыть краны 9.
- 3) Включить мешалку 10 и тщательно перемешать содержимое бачка до получения равномерной суспензии. Мешалку не выключать до окончания экспериментов.
- 4) Включить вакуум-насос 3, поднять элемент вакуум-филтра в верхнее положение, открыть кран 5 и тщательно продуть систему, так чтобы в корпусе филтра и трубопроводах не оставалось жидкости. Если при продувке в мернике филтра наберется жидкость, ее необходимо удалить при выключенном вакуум-насосе, как указано в п.2.
- 5) Закрыть кран 5 и по заданию преподавателя с помощью регулирующего крана 11 установить по вакууметру требуемую величину разрежения.
- 6) Погрузить элемент вакуум-филтра в суспензию на 40-50 мм. Включить питание электросекундомера. Открыть кран 5 и одновременно пустить секундомер.

7) Не останавливая секундомера, засечь время, когда в мерник 4 поступит первая капля фильтрата. При этом предварительный объем фильтрата будет равен нулю.

8) Через каждые 20-30 секунд производить замер предварительного объема фильтрата и данные занести в таблицу. Процесс фильтрации ведется до тех пор, пока скорость фильтрации не будет близка к нулю. За время фильтрации должно быть сделано не менее 12-15 замеров.

9) Закрыть кран 5 и одновременно остановить секундомер, выключить мешалку.

10) Поднять фильтр в верхнее положение, открыть кран 5 и тщательно продуть систему. Фильтрат, находившийся в корпусе фильтра и трубопроводах, сольется при этом в мерник 4. Измерить его объем. Прибавив полученный объем фильтрата ко всем предварительным значениям объема, получим действительный объем фильтрата для каждого времени фильтрации. Полученные данные занести в таблицу.

11) Выключить вакуум-насос и замерить толщину слоя осадка на фильтровальной перегородке, сбросить показания секундомера и отключить его от сети.

12) Промыть и просушить фильтр, слить фильтрат из мерника 4 и предохранительной емкости 8.

Таблица 6.1

| №<br>п/п | Время<br>фильтрации<br>$\tau, \text{с}$ | Объем фильтрата                         |                                     | $\frac{\tau}{V}, \frac{\text{с}}{\text{м}^3}$ |
|----------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------|
|          |                                         | Предварительный<br>$V_{np}, \text{м}^3$ | Действительный<br>$V_d, \text{м}^3$ |                                               |
|          |                                         |                                         |                                     |                                               |

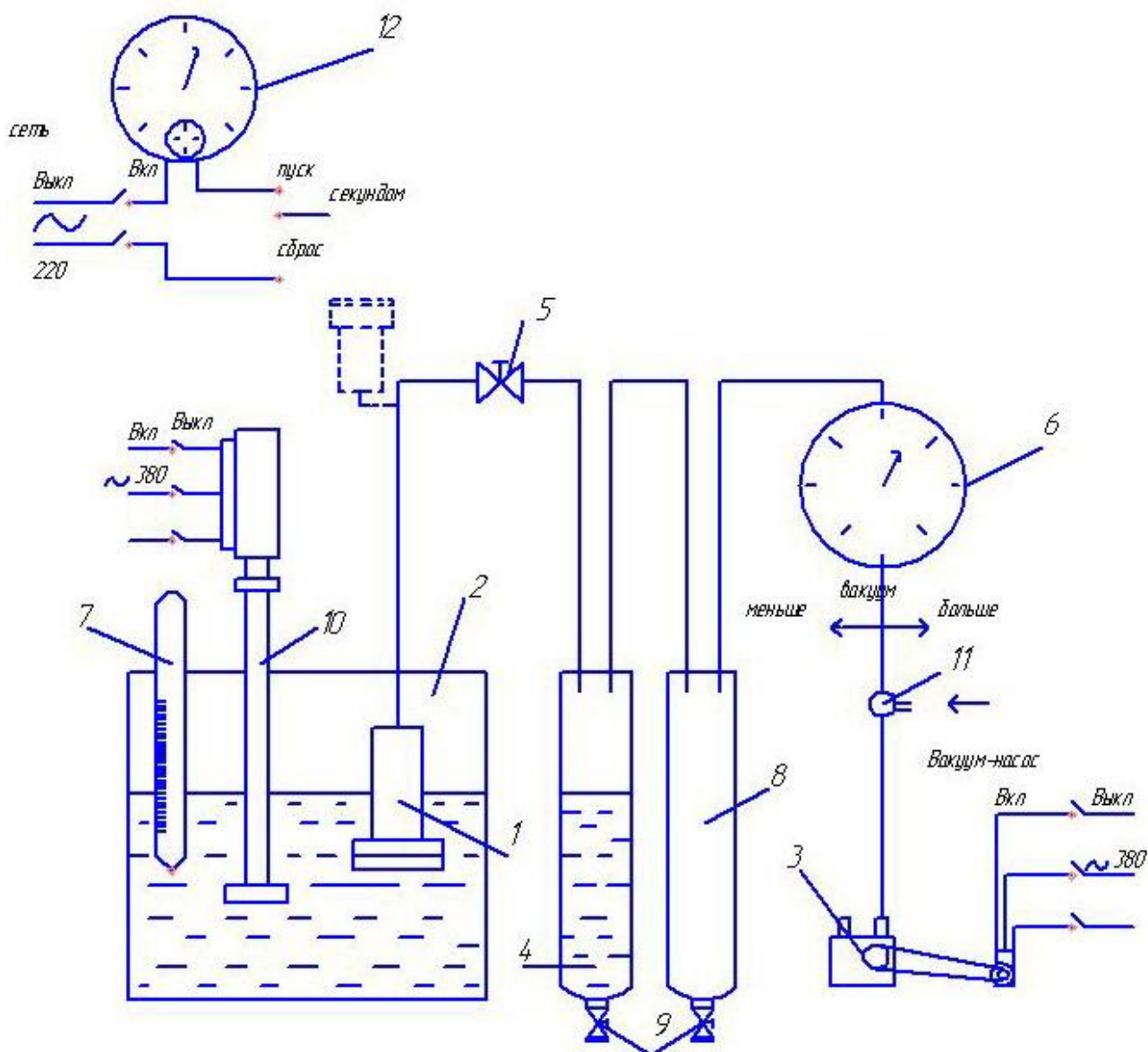


Рис. 6.2. Схема установки

1. Вакуум – фильтр. 2. Бачок 3. Вакуум – насос. 4. Приемник 5. Кран. 6. Вакуумметр.  
7. Термометр. 8. Предохранительная емкость. 9. Краны. 10. Мешалка.  
11. Кран – регулятор вакуума. 12 Секундомер.

### **Требования безопасности труда**

1. Запрещается работать при снятых защитных кожухах привода вакуум-насоса и мешалки.
2. Электродвигатели привода вакуум-насоса и мешалки должны иметь надежное заземление.
3. При работе на установке необходимо следить, чтобы все подводы и подключения вакуум-насоса, мешалки и электросекундомера были тщательно изолированы

## Обработка результатов эксперимента

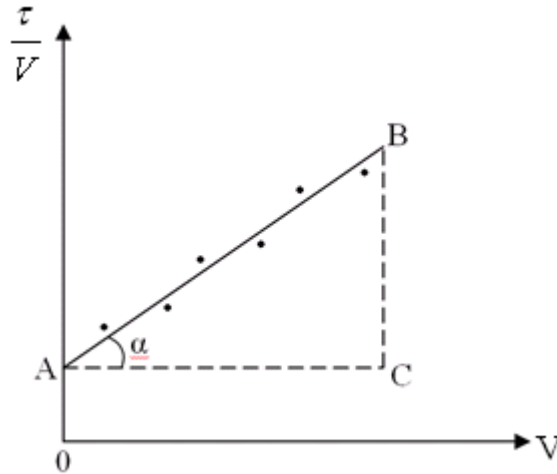


Рис.6.3. Зависимость  $\Delta \tau / \Delta \nu$  от  $\nu$ .

По результатам эксперимента строится график (рис.3)  $\frac{\tau}{V} = f(V)$ . Осредняющая прямая проводится таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от осредняющей прямой была минимальной.

$$M = \operatorname{tg} \alpha = \frac{BC}{AC}; \quad K = OA$$

Более точно параметры уравнения (6.6 а) можно определить методом наименьших квадратов. Тогда:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N V_i \left(\frac{\tau}{V}\right)_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{\tau}{V}\right)_i}{\sum_{i=1}^N V_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N V_i\right)^2}, \quad (6.9)$$

$$K = \frac{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{\tau}{V}\right)_i\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N V_i^2\right) - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N V_i\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N V_i \left(\frac{\tau}{V}\right)_i\right)}{\sum_{i=1}^N V_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N V_i\right)^2}, \quad (6.10)$$

где  $N$  — число измерений.

Точность описания аппроксимирующим уравнением экспериментальных точек оценивается дисперсией уклонения точек от прямой и дисперсией коэффициентов:

$$S_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\tau}{V}\right)_i^2}{N-2} - \frac{\left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{\tau}{V}\right)_i\right)^2}{N(N-2)} - \frac{\left(N \sum_{i=1}^N V_i \cdot \left(\frac{\tau}{V}\right)_i - \sum_{i=1}^N V_i \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{\tau}{V}\right)_i\right)^2}{\left[N \sum_{i=1}^N V_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N V_i\right)^2\right] \cdot N(N-2)}, \quad (6.11)$$

$$S_M^2 = \frac{S_O^2 \cdot N}{N \sum_{i=1}^N V_i^2 - (\sum_{i=1}^N V_i)^2}, \quad (6.12)$$

$$S_K^2 = \frac{S_O^2 \sum_{i=1}^N V_i^2}{N \sum_{i=1}^N V_i^2 - (\sum_{i=1}^N V_i)^2}, \quad (6.13)$$

где,  $S_O^2$  - дисперсия точек;

$S_M^2$  и  $S_K^2$  - дисперсия коэффициентов.

Для упрощения процедуры расчета результаты предварительных вычислений удобно занести в таблицу:

Таблица 6.2

| i     | $V_i, \text{м}^3$ | $(\frac{\tau}{V})_i, \frac{\text{с}}{\text{м}^3}$ | $V_i^2$ | $V_i \cdot (\frac{\tau}{V})_i$ |
|-------|-------------------|---------------------------------------------------|---------|--------------------------------|
| 1     |                   |                                                   |         |                                |
| 2     |                   |                                                   |         |                                |
| 3     |                   |                                                   |         |                                |
| ⋮     |                   |                                                   |         |                                |
| ⋮     |                   |                                                   |         |                                |
| N     |                   |                                                   |         |                                |
| Сумма |                   |                                                   |         |                                |

По найденным значениям констант фильтрации по уравнениям (6.7) и (6.8) найдем значения удельного сопротивления слоя осадка и сопротивления фильтровальной перегородки. Величину X найдем из соотношения:

$$X = \frac{\delta \cdot F}{V},$$

где,  $\delta$  - толщина слоя осадка, м.

При известных значениях  $\gamma$  и  $R_{\text{пер}}$  расчет процесса фильтрации можно вести по уравнениям (4) и (5).

Приведем уравнение (4) к виду:

$$MF^2q + KFq = \tau, \quad (6.14)$$

где,  $q = \frac{V}{F}$  - удельная производительность фильтра,  $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^2}$ .

По уравнению (6.14) построить график зависимости  $q=f(\tau)$  (рис. 6.4) и нанести на него экспериментальные точки

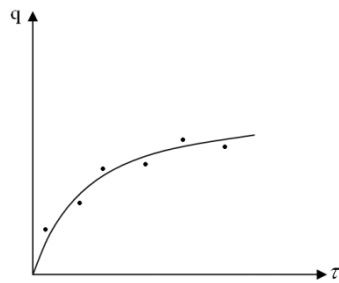


Рис.6.4. Зависимость  $q = f(\tau)$ .

Сравнить расчетную и экспериментальную кривые фильтрации и объяснить причину расхождения, если оно есть.

Тангенс угла наклона касательной к кривой фильтрации  $q = f(\tau)$  в данной точке характеризует скорость процесса фильтрации.

Работа заканчивается определением скорости фильтрации в начальный  $C_H$  и конечный  $C_K$  моменты времени:

$$C_H = \frac{V_l}{F\tau_l}; \quad C_K = \frac{V_N}{F\tau_N}.$$

### ***Содержание и оформление отчета о работе***

Отчет о работе оформляется в тетради. Он должен содержать:

1. название лабораторной работы;
2. формулировка цели работы;
3. основные понятия, определения и расчетные формулы;
4. схему установки;
5. результаты наблюдений, сведенные в табл. 6.1, 6.2 и графики (рис.6.3, 6.4), построенные на миллиметровой бумаге;
6. расчеты скорости фильтрации;
7. анализ полученных результатов и выводы.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что называется процессом фильтрации?
2. Что называется скоростью процесса фильтрации?
3. Что является движущей силой процесса фильтрации?
4. Из чего складывается сопротивление процессу фильтрации?
5. Какие способы проведения процесса фильтрации Вы знаете?
6. Как изменяется движущая сила и сопротивление фильтрации при различных способах проведения процесса?
7. Назовите способы создания движущей силы процесса фильтрации.
8. Какие виды осадков и фильтровальных перегородок Вы знаете?
9. Что такое константы фильтрации, и как они определяются?
10. Что характеризует константа фильтрации  $M$ ?
11. Что характеризует константа фильтрации  $K$ ?
12. Как определить скорость фильтрации по графику  $q = f(\tau)$ ?
13. Как изменяется скорость фильтрации во времени при различных способах проведения процесса?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ КИПЯЩЕГО СЛОЯ

### *Основные положения и цель работы*

*Цель работы:* получить экспериментальные зависимости гидравлического сопротивления и высоты зернистого слоя от фиктивной скорости газа; определить опытным и аналитическим путём значения скорости псевдоожижения и скорости уноса частиц; рассчитать гидравлическое сопротивление и высоту зернистого слоя; сравнить результаты эксперимента и расчёта.

В пищевом, химическом и ряде других производств широко распространены процессы, взаимодействия газов (реже - капельных жидкостей) с мелкозернистыми твёрдыми частицами. Эти процессы осуществляются в аппаратах с так называемым «кипящим» (взвешенным, псевдоожиженным) слоем. Аппараты с кипящим слоем используются для проведения обжига, теплообмена, сушки, адсорбции, каталитических и других процессов. При этом гидравлическое сопротивление кипящего слоя относительно невелико, а уменьшение размеров его частиц приводит к увеличению поверхности их контакта, в результате чего скорость протекания указанных процессов значительно возрастает.

Формы и размеры зернистых слоев весьма разнообразны: небольшие гранулы, таблетки, кусочки катализаторов, адсорбентов и т.п. В зависимости от того, одинаковы или различны по размеру частицы данного слоя, зернистые слои называются монодисперсными или полидисперсными.

Зернистый слой характеризуется размером его частиц, их удельной поверхностью и долей свободного объёма.

Удельная поверхность частиц  $a$ ,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ , представляет собой поверхность твёрдых частиц слоя в единице его объёма.

Доля свободного объёма или порозность слоя  $\varepsilon$  представляет собой объёмную долю газа (жидкости) в слое:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{сл}} - V_m}{V_{\text{сл}}} = 1 - \frac{V_m}{V_{\text{сл}}}. \quad (7.1)$$

Для неподвижного слоя шаровых частиц одинакового диаметра величина  $\varepsilon \approx 0.4$  независимо от диаметра частиц.

На рис. 1 показаны три возможных состояния слоя твёрдых частиц в зависимости от скорости восходящего газового потока.

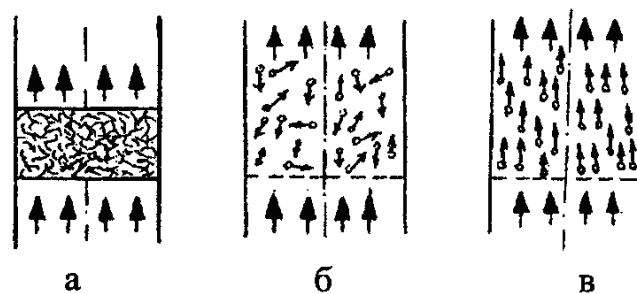


Рис.7.1. Движение газа (жидкости) через зернистый слой:  
а) неподвижный слой; б) кипящий слой; в) унос частиц слоя потоком газа

При относительно небольших скоростях газа зернистый слой остаётся неподвижным (рис.7.1а), и характеристики слоя ( $\alpha$ ,  $\epsilon$  и др.) не меняются с изменением скорости потока. При некоторой скорости газа, называемой критической, слой перестаёт быть неподвижным, его порозность и высота начинают увеличиваться, слой приобретает текучесть и во многом напоминает кипящую жидкость. Такое состояние зернистого слоя называется кипящим или псевдооживленным ("псевдо" - как бы, наподобие). В таком слое твёрдые частицы интенсивно перемещаются в различных направлениях (рис.7.1б), причём весь слой в целом имеет ясно выраженную поверхность раздела с газовым потоком. При дальнейшем увеличении скорости потока порозность слоя и его высота будут возрастать до того момента, пока скорость не достигнет другого критического значения, при котором слой разрушается и частицы слоя начинают уноситься потоком (рис.7.1в). Явление массового уноса твёрдых частиц потоком газа называется пневмотранспортом и используется в различных отраслях промышленности для перемещения сыпучих материалов.

Типичные графики изменения перепада давления (гидравлического сопротивления) в зернистом слое и его высоты в зависимости от фиктивной скорости газа представлены на рис.7.2.

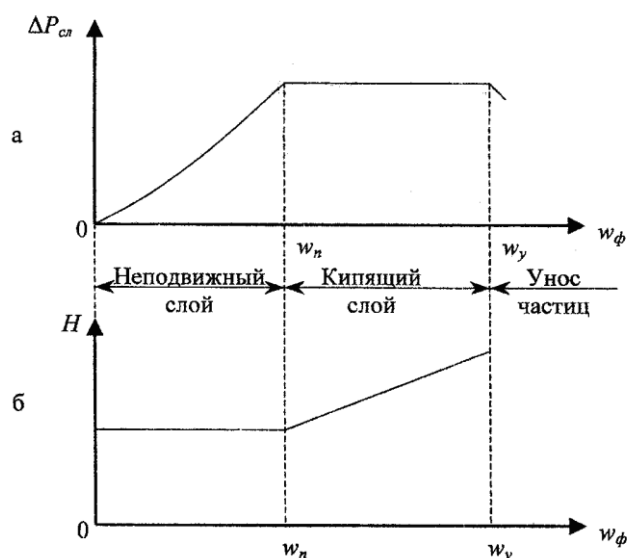


Рис. 7.2. Зависимости от фиктивной скорости газового потока:  
а) гидравлического сопротивления зернистого слоя; б) его высоты

Фиктивная скорость газа  $w_\phi$  - это скорость, отнесённая ко всему поперечному сечению аппарата, то есть

$$w_\phi = \frac{Q}{F}, \quad (7.2)$$

где  $Q$  - объёмный расход газа,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$F$  - площадь поперечного сечения аппарата,  $\text{м}^2$ .

Действительная скорость газа  $w$  в промежутках между частицами слоя всегда будет больше фиктивной. Величину действительной скорости газа непосредственно измерить трудно. Зависимость между величинами  $w$  и  $w_\phi$  выражается соотношением:

$$w = \frac{w_\phi}{\varepsilon}, \quad (7.3)$$

из которого при известных значениях  $w_\phi$  и  $\varepsilon$  можно определить величину действительной скорости газа.

Скорость, при которой нарушается неподвижность слоя и он начинает переходить в псевдооживлённое состояние, называется скоростью псевдооживления  $w_n$ .

Переход твёрдых частиц неподвижного слоя во взвешенное состояние начинается при условии равенства силы  $P$  динамического воздействия на частицу потока газа весу этой частицы  $G$  за вычетом подъёмной (архимедовой) силы  $A$ , то есть при условии:

$$P = G - A. \quad (7.4)$$

Для шаровой частицы

$$P = \zeta \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho_c w^2}{2}; \quad (7.5)$$

$$G = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_m \cdot g; \quad (7.6)$$

$$A = \frac{\pi d^3}{6} \rho_c \cdot g, \quad (7.7)$$

где  $\zeta$  - безразмерный коэффициент сопротивления среды;

$d$  - диаметр частицы,  $\text{м}$ ;

$\rho_m, \rho_c$  - плотности твёрдых частиц и среды соответственно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$g$  - ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ .

Из уравнений (7.6), (7.7) находим:

$$G - A = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot (\rho_m - \rho_c) \cdot g. \quad (7.8)$$

Если движущаяся среда - газ, то величиной  $\rho_c$  в уравнении (7.8) можно пренебречь ( $\rho_m \gg \rho_c$ ). Уравнение (7.4) примет вид:

$$P = G. \quad (7.9)$$

Для того чтобы все частицы слоя перешли во взвешенное состояние, давлению газа необходимо преодолеть вес частиц, приходящихся на единицу площади  $F$  поперечного сечения аппарата. Отсюда

$$\Delta P_{cl} = \frac{G_{cl}}{F}. \quad (7.10)$$

Из уравнения (7.10) следует, что для взвешенного слоя величина потери давления постоянна, то есть не зависит от скорости газа (рис.7.2а). Это постоянство величины  $\Delta P_{cl}$  объясняется тем, что при возрастании фиктивной скорости газа происходит одновременное увеличение объёма взвешенного слоя и расстояния между частицами. Вследствие этого действительная скорость газа, определяющая гидравлическое сопротивление слоя, также остаётся неизменной. Высота взвешенного слоя с увеличением фиктивной скорости газа непрерывно возрастает (рис.7.2б).

Рис.7.2 показывает, что условие  $\Delta P_{cl} = \text{const}$  выполняется для всей области существования кипящего слоя вплоть до момента, когда величина  $w_\phi$  достигает значения, при котором слой разрушается и начинается унос твёрдых частиц потоком. Эту скорость, предельную для взвешенного слоя, называют скоростью уноса  $w_y$  или скоростью свободного витания частиц. Последнее название обусловлено тем, что при массовом уносе порозность слоя  $\varepsilon$  стремится к 1 ( $V_{cl} \gg V_m$ ) и движение отдельных частиц можно считать независимым от воздействия других частиц слоя. При этом каждая отдельная частица свободно витает: не осаждаётся и не уносится потоком, то есть её вес  $G$  уравнивается силой  $P$  динамического воздействия среды. Исходя из этого условия, может быть найдено значение  $w_y$ . Малейшее превышение скорости  $w_\phi$  над величиной  $w_y$  приводит к уносу частиц.

Из сказанного следует, что условие витания частицы в восходящем потоке идентично условию её равномерного осаждения в неподвижной среде. Поэтому значение  $w_y$  можно определить так же, как и значение скорости осаждения.

Таким образом, взвешенный слой шаровых частиц одинакового диаметра может существовать в пределах от  $\varepsilon = 0,4$  (при  $w_\phi = w_n$ ) до  $\varepsilon = 1$  (при  $w_\phi = w_y$ ). С некоторым приближением эти пределы можно принять и для округлых частиц, а также частиц, имеющих форму многогранника.

Следует отметить, что резкий переход от неподвижного к псевдооживленному состоянию характерен лишь для зернистых слоев с частицами одинаковой дисперсности. Для полидисперсных слоев существует не скорость псевдооживления, а область скоростей псевдооживления, в которой начинается и завершается переход от неподвижного к полностью псевдооживленному слою.

Отношение рабочей скорости  $w_\phi$ , величина которой всегда находится в пределах между значениями  $w_n$  и  $w_y$ , к скорости начала псевдоожижения называется числом псевдоожижения

$$K_w = \frac{w_\phi}{w_n} > 1 \quad (7.11)$$

Число псевдоожижения характеризует интенсивность перемешивания твёрдых частиц и состояние кипящего слоя. Опыт показал, что во многих случаях интенсивное перемешивание достигается уже при значениях  $K_w=2$ . Оптимальное значение величины  $K_w$  для каждого конкретного технологического процесса обычно устанавливается опытным путём и может изменяться в довольно широких пределах.

Характеристики кипящих слоев  $\varepsilon$ ,  $H$  неодинаковы при псевдоожижении их с помощью газа или капельной жидкости. Полностью однородное псевдоожижение твёрдых частиц возможно лишь в потоке капельной жидкости, причём постепенное увеличение расхода жидкости приводит к соответствующему возрастанию высоты слоя без заметных колебаний его верхней границы. При этом расстояние между частицами также увеличивается постепенно, а жидкость движется между ними сплошным потоком.

Для системы газ - твёрдая фаза, наиболее часто используемой на практике, псевдоожижение, как правило, является неоднородным, то есть часть газа движется через слой не сплошным потоком, а в виде пузырей, которые разрушаются, достигнув верхней границы слоя, что вызывает колебания его высоты. Пока значение числа  $K_w$  не велико, неоднородность слоя не оказывает отрицательного воздействия на его характеристики, а движущиеся пузыри, наоборот, интенсифицируют перемешивание частиц в слое.

При значительном увеличении скорости газа неоднородность слоя возрастает, так как через него все чаще прорываются более крупные пузыри и начинается интенсивное выбрасывание твёрдых частиц над поверхностью слоя. Пузыри газа могут увеличиваться в объёме столь значительно, что, наконец, их размер достигает диаметра аппарата (рис.7.3). При этом псевдоожиженный слой разделяется на отдельные части газовыми "пробками". Часть слоя, находящаяся над "пробкой", подбрасывается вверх, что приводит к большому выбросу твёрдых частиц. Такой режим работы называют поршневым псевдоожижением.

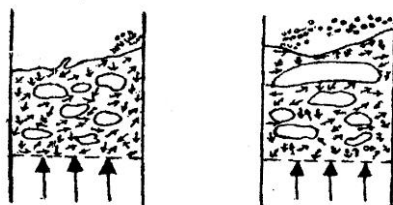


Рис. 7.3. Неоднородное псевдоожижение в системе газ - твёрдая фаза

Его возникновению способствуют, кроме возрастания скорости газа, увеличение размера частиц и уменьшение диаметра аппарата. Поршневой

режим нежелателен, так как при нём ухудшается равномерность контакта между газом и твёрдыми частицами.

При псевдоожигении некоторых материалов однородность слоя нарушается вследствие каналообразования, когда происходит проскок (байпасирование) значительного количества газа (жидкости) через один или несколько каналов, образующихся в слое. Особенно часто каналообразование наблюдается при использовании материалов с очень мелкими или слипающимися частицами, склонными к агломерации. Предельным случаем каналообразования является фонтанирование, при котором поток газа прорывается сквозь слой по одному большому каналу, возникающему вблизи оси аппарата.

При расчёте гидравлического сопротивления зернистых слоев используют зависимость, аналогичную по виду уравнению для определения потери давления на трение в трубопроводах:

$$\Delta P_{cl} = \lambda \cdot \frac{L}{d_s} \cdot \frac{\rho_c \cdot w^2}{2}, \quad (7.12)$$

где,  $\lambda$  - общий коэффициент сопротивления (отражает влияние сопротивления трения и дополнительных местных сопротивлений, возникающих при движении среды по искривлённым каналам в слое и обтекании ею отдельных твёрдых частиц); для всех режимов течения применимо уравнение:

$$\lambda = \frac{133}{Re} + 2,34; \quad (7.13)$$

$L$  - длина каналов в слое, принимают равной высоте слоя  $H$ , м;

$d_s$  - эквивалентный диаметр, соответствующий суммарному поперечному сечению каналов в слое,  $d_s = 4\varepsilon / a$ , м.

$$a = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_{\text{эш}} \cdot \Phi}, \quad (7.14)$$

где,  $d_{\text{эш}}$  - диаметр эквивалентного шара, имеющего тот же объём, что и частица, м;

$\Phi$  - фактор формы твёрдой частицы слоя.

$$\Phi = \frac{F_{\text{ш}}}{F}, \quad (7.15)$$

$F_{\text{ш}}$  - поверхность шара, имеющего тот же объём, что и рассматриваемая частица поверхностью  $F$ .

Критерий Рейнольдса в уравнении (7.13) определяется по формуле

$$Re = \frac{w \cdot d_s \cdot \rho_c}{\mu_c} = \frac{w_\phi \cdot 4\varepsilon \cdot \rho_c}{\varepsilon \cdot a \cdot \mu_c} = \frac{4 \cdot w_\phi \cdot \rho_c}{a \cdot \mu_c}, \quad (7.16)$$

или, подставляя значение величины  $a$  из (7.14),

$$Re = \frac{2}{3} \cdot \frac{\Phi}{1-\varepsilon} \cdot \frac{w_\phi \cdot d_{\text{ш}} \cdot \rho_c}{\mu_c} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\Phi}{1-\varepsilon} Re_\phi, \quad (7.16a)$$

где безразмерный комплекс  $Re_\phi$  есть модифицированный критерий Рейнольдса, выраженный через фиктивную скорость среды и размер частиц слоя:

$$Re_\phi = \frac{w_\phi \cdot d_{\text{ш}} \cdot \rho_c}{\mu_c}; \quad (7.17)$$

где,  $\mu_c$  - динамический коэффициент вязкости среды, Па·с.

При подстановке указанных значений величин  $\lambda$ ,  $L$ ,  $d_3$ ,  $a$ ,  $w$  и  $Re$  в уравнение (12) окончательно будем иметь, Па:

$$\Delta P_{cl} = 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2 \cdot \mu_c \cdot H \cdot w_\phi}{\varepsilon^3 \cdot \Phi \cdot d_{\text{ш}}^2} + 1.75 \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3 \cdot \Phi} \cdot H \cdot \frac{\rho_c \cdot w_\phi^2}{d_{\text{ш}}}. \quad (7.18)$$

Приравнивая правые части уравнений (7.18) и (7.10) и подставляя в (7.10) значение величины  $G_{cl} = (\rho_m - \rho_c) \cdot g \cdot F \cdot H \cdot (1-\varepsilon)$ , проводя сокращения и математические преобразования, получим выражение критического значения величины  $Re_{\phi n}$ , при которой начинается псевдоожижение

$$Re_{\phi n} = \frac{Ar}{1400 + 5.22\sqrt{Ar}}, \quad (7.19)$$

где  $Ar$  - критерий Архимеда

$$Ar = \frac{d_{\text{ш}}^3 \cdot \rho_c \cdot (\rho_m - \rho_c) \cdot g}{\mu_c^2}. \quad (7.20)$$

Зная величину  $Re_{\phi n}$  из уравнения (7.17) определяют фиктивную скорость псевдоожижения  $w_n$ .

Высота кипящего слоя  $H_n$  и первоначальная высота неподвижного слоя  $H_n$  связаны зависимостью:

$$H_n(1-\varepsilon_n) = H_n(1-\varepsilon_n). \quad (7.21)$$

Расчет скорости уноса проводят аналогично расчету скорости свободного осаждения частиц по уравнению, пригодному для всех режимов:

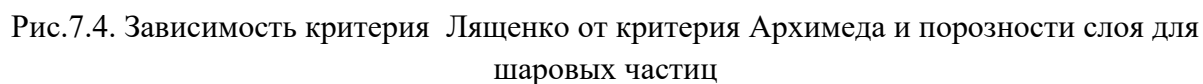
$$Re_{\phi y} = \frac{Ar}{18 + 0.575\sqrt{Ar}}. \quad (7.22)$$

По величине  $Re_{\phi y}$  из уравнения (7.17) находят фиктивную скорость уноса  $w_y$ .

Существует и несколько иной подход к теоретическому определению величины скоростей  $w_n$  и  $w_y$ . При этом уравнение (7.10) методами теории подобия преобразуют в критериальную зависимость:

$$Ly = f(Ar, \varepsilon), \quad (7.23)$$

графическое изображение которой представлено на рис. 7.4.


$$Ly = \frac{w_\phi^3 \cdot \rho_c^2}{\mu_c \cdot (\rho_m - \rho_c) \cdot g}. \quad (7.24)$$
$$L_y = \frac{\omega_\phi^3 \cdot \rho_c^2}{\mu_c \cdot \rho_m \cdot g}; \quad (7.24, a)$$

49

Средний эквивалентный диаметр частиц неправильной формы, м,

$$d_{\text{э}} = 1,243 \sqrt{\frac{M}{\rho_m}}, \quad (7.26)$$

где,  $M$  – средняя масса частицы, кг.

Для значения критерия  $Ar$ , найденного из уравнения (7.25), по рис.4 определяют критерий  $Lu$  для значений  $\varepsilon = 0,4(\omega_{\phi} = \omega_n)$  и  $\varepsilon = 1(\omega_{\phi} = \omega_v)$ , по величине которого рассчитывают теоретическое значение скоростей псевдоожижения и уноса.

### **Описание лабораторной установки**

Установка (рис.5) состоит из экспериментального аппарата 1 и двухступенчатого вентилятора 2. В аппарате находится слой твердых частиц – капроновая крошка ( $\rho_m = 1140 \text{ кг/м}^3$ ).

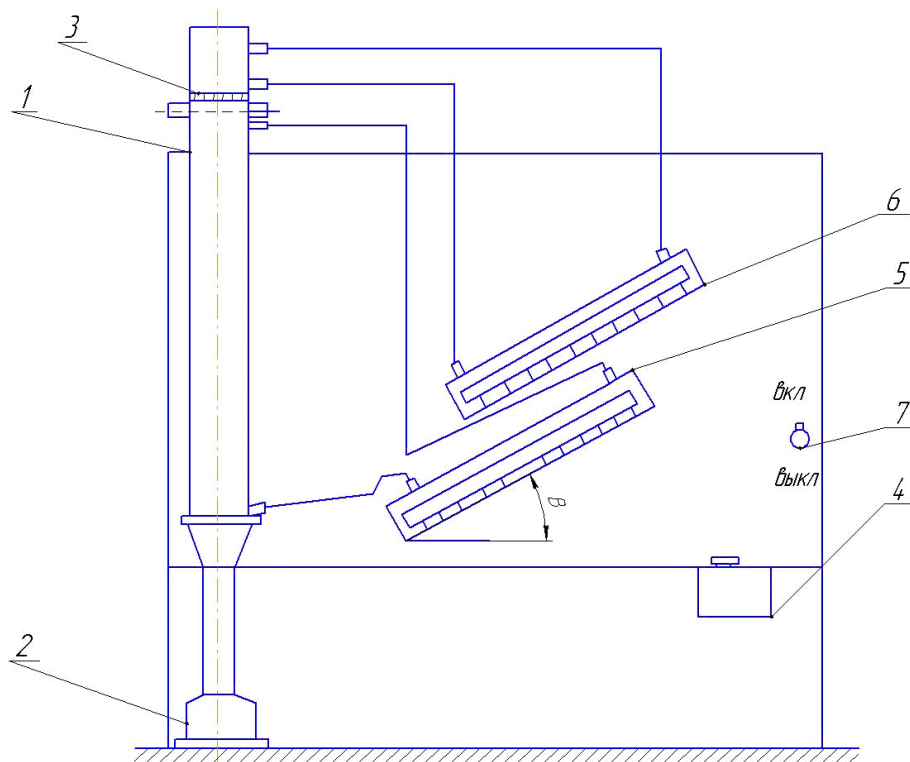


Рис.7.5. Схема экспериментальной установки: 1 – экспериментальный аппарат; 2 – вентилятор; 3 – мерная диафрагма; 4 – регулятор расхода воздуха; 5, 6 – наклонные микроманометры; 7 – выключатель

Воздух вентилятором 2 подаётся под нижнюю опорную сетку, на которой находится зернистый материал. Скорость воздуха в аппарате определяется с помощью тарировочного графика (рис. 7.6) в зависимости от перепада давления на мерной диафрагме 3, который измеряется микроманометром 6. Изменение скорости воздуха в аппарате осуществляется с помощью регулятора расхода 4 путём изменения числа оборотов рабочего колеса вентилятора.

Измерение гидравлического сопротивления слоя зернистого материала осуществляется наклонным микроманометром 5.

Для предупреждения выброса твёрдых частиц из аппарата перед мерной диафрагмой установлена верхняя защитная сетка.

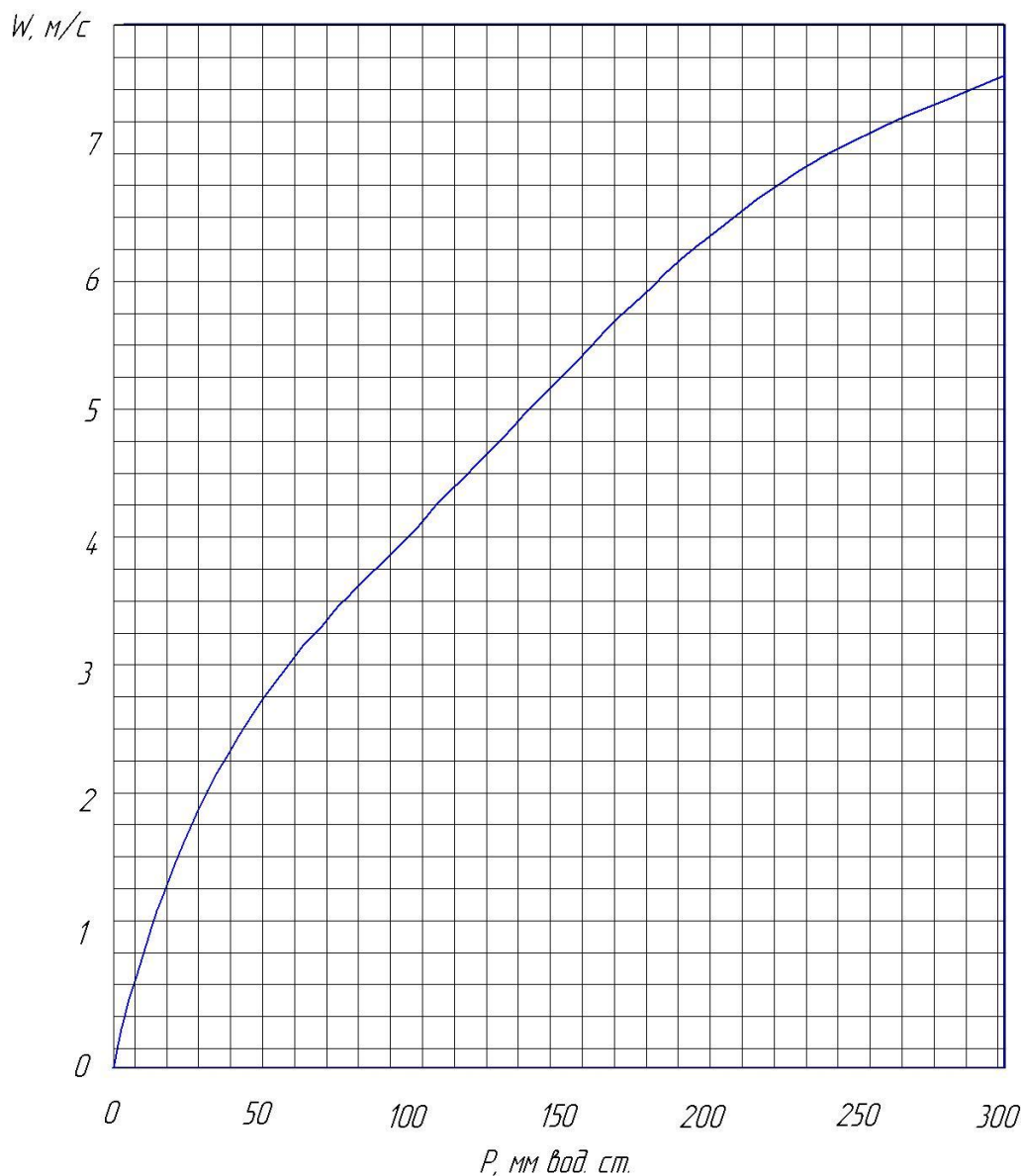


Рис.7.6 Зависимость скорости воздуха в аппарате от перепада давления

### **Порядок проведения работы**

Приступить к выполнению данной лабораторной работы можно лишь с разрешения преподавателя после тщательного изучения настоящих указаний и уяснения целей и методики проведения работы.

*Рекомендуется следующая последовательность работы:*

1. Установить ручку регулятора расхода воздуха в крайнее положение, вращая против часовой стрелки.

2. Установить выключатель 7 в положение «Включено»

3. Плавно вращая ручку регулятора расхода воздуха по часовой стрелке, установить 10 - 12 значений расхода воздуха, начиная с неподвижного слоя и заканчивая уносом, когда первые частицы начнут «прилипать» к верхней защитной сетке. При этом постарайтесь уловить и зафиксировать момент начала увеличения объёма слоя и начало движения частиц в слое.

4. Для каждого значения расхода воздуха с помощью микроманометров 5 и 6 измеряются гидравлическое сопротивление слоя зернистого материала и перепад давления на мерной диафрагме, а с помощью линейки измеряется высота слоя зернистого материала.

Гидравлическое сопротивление слоя зернистого материала определяется по формуле:

$$\Delta P_{cl} = \Delta P_M \sin \alpha, \quad (27)$$

где,  $\Delta P_M$  - длина столба жидкости в наклонной трубке микроманометра, мм;

$\alpha$  - угол наклона трубки микроманометра к горизонту.

5. Для каждого значения расхода воздуха по показаниям микроманометра 6 с помощью тарировочного графика (рис. 6) определяется скорость воздуха в аппарате.

6. Установить ручку регулятора расхода воздуха 4 в крайнее положение, вращая её по часовой стрелки. Выключатель 7 установить в положение «Выключено».

7. Полученные экспериментальные данные занести в табл. 1.

Таблица 7.1

| Перепад давления на диафрагме, $\Delta P_d$ , мм вод.ст. | Скорость воздуха $\omega_\phi$ , м/с | Перепад давления в слое $\Delta P_M$ , мм вод. ст. | Гидравлическое сопротивление слоя $\Delta P_{cl}$ , мм вод. ст. | Высота слоя Н, мм |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|
|                                                          |                                      |                                                    |                                                                 |                   |

8. По данным табл. 7.1 построить графики зависимостей  $\Delta P_{cl} = f(\omega_\phi)$  и  $H = f(\omega_\phi)$ , из которых найти экспериментальные значения скорости псевдоожижения  $w_n$  и скорости уноса  $w_y$  частиц слоя.

9. Определить по (7.26) средний эквивалентный диаметр твёрдых частиц слоя, если масса 100 их штук составляет 3,4348 г.

10. Определить для условий эксперимента величину критерия Архимеда  $Ag$  по (7.25). Значения  $\rho_c$  и  $\mu_c$  находят по справочным данным в зависимости от температуры.

11. По найденной величине  $Ag$  определить критические значения величин  $Re_{\phi n}$  по (7.19) и  $Re_{\phi y}$  по (7.22).

12. Зная величины  $Re_{\phi n}$  и  $Re_{\phi y}$ , найти теоретическое значение фиктивных скоростей псевдоожижения и уноса (7.17).

13. Определить теоретические значения скоростей псевдоожижения и уноса несколько иным путем.

Для этого по найденному значению  $Ag$  из рис.4 найти величины критерия Лященко для значений  $\varepsilon = 0,4(\omega_\phi = \omega_n)$  и  $\varepsilon = 1(\omega_\phi = \omega_y)$ . По известным величинам критерия  $Lu$  рассчитать значение скоростей  $\omega_n$  и  $\omega_y$  (24а).

14. Для значения фиктивной скорости  $\omega_n < \omega_\phi < \omega_y$  (по заданию преподавателя) определить теоретическое значение высоты кипящего слоя твердых частиц  $H_n$ . Для этого:

- определить по заданному значению скорости  $\omega_\phi$  величину  $Lu$ ;
- зная величины  $Lu$  и  $Ag$  по рис. 4, найти теоретическое значение порозности  $\varepsilon_n$  кипящего слоя;
- рассчитать теоретическое значение высоты  $H_n$  кипящего слоя по (7.21) по найденной величине  $\varepsilon_n$  и известным  $H_n$  и  $\varepsilon_H$ .

15. Определить теоретическое значение гидравлического сопротивления псевдоожиженного слоя (7.18) по заданному в п.14 значению  $\omega_\phi$  и соответствующим ему значениям величин  $H_n$  и  $\varepsilon_n$ ; величину фактора формы принять равной  $\Phi=0,8$ .

16. Сравнить экспериментальные и теоретические данные, записав их в табл. 2.

Оценить расхождение результатов по формуле:

$$\delta = \frac{\text{эксп.знач.} - \text{теор.знач.}}{\text{эксп.знач.}} 100\%, \quad (7.28)$$

сделать выводы.

Таблица 7.2

| $\omega_n$ , м/с     |        |          | $\omega_y$ , м/с     |        |          | $H_n$ , м       |        | $\Delta P_{сл}$ , Па |        |
|----------------------|--------|----------|----------------------|--------|----------|-----------------|--------|----------------------|--------|
| Эксп.                | (7.17) | (7.24,а) | Эксп.                | (7.17) | (7.24,а) | Эксп.           | (7.21) | Эксп.                | (7.18) |
|                      |        |          |                      |        |          |                 |        |                      |        |
| $\delta(\omega_n)\%$ |        |          | $\delta(\omega_y)\%$ |        |          | $\delta(H_n)\%$ |        | $\delta(P_{сл})\%$   |        |

17. Оформить отчёт о работе. В отчёте должны быть представлены: цель работы; схема установки; графики; использованные расчётные формулы; подробные расчёты и выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. В каких процессах применяются аппараты с кипящим слоем, и каковы их преимущества?

2. Какими могут быть форма и размер частиц зернистых слоёв?
3. Какие зернистые слои называются монодисперсными и полидисперсными?
4. Каковы основные характеристики зернистого слоя? Дайте их определение.
5. В каких пределах изменяется порозность взвешенного слоя?
6. Назовите три возможных состояния слоя твёрдых частиц и охарактеризуйте каждое из них.
7. Что называется фиктивной и действительной скоростью газа? Каково соотношение между ними?
8. Что называется скоростью псевдоожижения и скоростью уноса? От чего зависят величины этих скоростей?
9. Что такое рабочая скорость газа и число псевдоожижения? Что оно характеризует и в каких пределах изменяется?
10. Какие силы действуют на частицы зернистого слоя при прохождении через него восходящего потока газа?
11. При каком соотношении действующих сил твёрдые частицы переходят во взвешенное состояние?
12. Какой характер имеет зависимость высоты зернистого слоя от расхода газа? Объясните полученную зависимость.
13. Какой характер имеет зависимость порозности зернистого слоя от расхода газа? Изобразите эту зависимость графически.
14. Почему с увеличением фиктивной скорости газа гидравлическое сопротивление неподвижного слоя растёт, а взвешенного - остаётся постоянным?
15. Почему скорость псевдоожижения практически не зависит от высоты слоя?
16. Как будет изменяться порозность взвешенного слоя с увеличением размера твёрдых частиц при постоянном расходе газа?
17. Как определить гидравлическое сопротивление взвешенного слоя, зная вес всех частиц неподвижного слоя?
18. Что называется областью скоростей псевдоожижения? Для каких зернистых слоёв она характерна?
19. Охарактеризуйте процесс однородного псевдоожижения. Для каких систем он возможен?
20. Дайте характеристику процессов неоднородного псевдоожижения. Что такое поршневое псевдоожижение, каналообразование, фонтанирование? Назовите их недостатки.
21. Укажите пути теоретического определения величин скоростей псевдоожижения и уноса частиц зернистого слоя.
22. Изложите (по схеме установки) методику проведения экспериментальной части работы.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ЭНЕРГИИ НА ПЕРЕМЕШИВАНИЕ

### *Общие положения и цель работы*

*Цель работы:* исследовать экспериментально расход энергии в зависимости от условий работы мешалки; рассчитать теоретический расход энергии на перемешивание; результаты сравнить.

Перемешивание является одним из самых распространенных процессов в химической и смежных с ней отраслях промышленности, а также в повседневной жизни. Перемешивание может протекать самопроизвольно, например, за счет диффузии компонентов системы, или же принудительным путем вследствие подвода к системе извне механической энергии, например, с помощью мешалок. На производстве перемешивание осуществляется в целях:

- обеспечения равномерного распределения и дробления до заданной дисперсности газов и жидкости или жидкости в жидкости, а также равномерного распределения твердых частиц в объеме жидкости;
- интенсификации нагревания или охлаждения обрабатываемых масс, а также обеспечения равномерного распределения растворенного вещества в перемешиваемом объеме;
- интенсификации массообмена в перемешиваемой среде, а также обеспечения равномерного распределения температуры в перемешиваемом объеме;
- интенсификации массообмена в перемешиваемой среде, а также равномерного распределения растворенного вещества в перемешиваемой массе.

В результате перемешивания можно получить однородные растворы (или смеси сыпучих материалов), эмульсии и суспензии.

Перемешивание производится как в реакционных аппаратах (автоклавах, сульфураторах, нитраторах и т.д.), так и в специальных аппаратах (смесителях, аппаратах с мешалками), а также в промежуточных аппаратах, трубопроводах, хранилищах.

Перемешивание производится при проведении как периодических, так и непрерывных процессов. Существует много конструкций перемешивающих устройств: перемешивание газом или паром; перемешивание циркуляцией жидкости; вибрационное и пульсационное перемешивание; перемешивание механическими мешалками с вращательными движениями перемешивающих органов.

Каждый из перечисленных видов перемешивающих устройств имеет свои специфические преимущества и недостатки, и определенную область применения.

Наиболее распространены в настоящее время аппараты с вращающимися механическими мешалками разных типов (приложение 1).

При перемешивании такими мешалками возникает сложное трехмерное течение жидкости. Первичным в этом течении является тангенциальное движение, которое в пространстве, ограниченном дном и стенками аппарата и свободной поверхностью жидкости, вызывает радиальные и аксиальные потоки.

Поскольку аналитического описания поля скоростей в аппаратах с мешалками до настоящего времени получить не удалось, то их характеризуют технологической интенсивностью и эффективностью.

Интенсивностью  $I$  действия аппарата с мешалкой называют возможность достижения некоторого заданного, строго определенного технологического результата (качества перемешивания) за определенное время  $\tau$ :

$$I_{n \text{ const}} = \varphi \cdot (\tau).$$

Эффективностью  $E$  аппарата с перемешивающими устройствами будем называть возможность достижения заданного технологического результата (качества перемешивания) при затрате определенной работы  $N\tau$ :

$$E = f(N\tau),$$

где  $N$  - мощность, потребляемая мешалкой.

Очевидно, что действие мешалки тем более эффективно, чем меньшая работа затрачивается на достижение требуемого технологического результата. Мощность, потребляемая механическими мешалками, зависит от многих факторов. Существующие методы расчета не вполне точно учитывают такие факторы, как форма и размеры аппаратов и перемешивающих органов, наличие препятствий: змеевиков, гильз, труб, отражательных перегородок и т. п.

При проведении технологических процессов перемешиваемая среда может изменить температуру и физические свойства (плотность, вязкость), что отражается на потребляемой мешалкой мощности. Поэтому в ответственных случаях результаты расчетов проверяют на лабораторных и пилотных установках.

Рассматривая течение жидкости в аппаратах с мешалкой, как частный случай движения жидкости, для описания процесса при установившемся режиме можно воспользоваться общим критериальным уравнением:

$$Eu = \varphi(Re, Fr, \Gamma_1, \Gamma_2), \quad (8.1)$$

где  $Eu$  - критерий Эйлера, являющийся мерой отношения сил движения к силам инерции;

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot w^2} \quad (8.2)$$

$Re$  - критерий Рейнольдса, являющийся мерой отношения сил инерции к силам внутреннего трения;

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu} \quad (8.3)$$

Fr - критерий Фруда, являющийся мерой отношения сил инерции к силам тяжести;

$$Fr = \frac{U^2}{qd} \quad (8.4)$$

В этих выражениях:  $\Gamma_1, \Gamma_2$  - симплексы геометрического подобия;

$\Delta P$  - потери давления, Па;

$U$  - средняя скорость движения потока, м/с;

$d$  - определяющий линейный размер, м;

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

$\mu$  - вязкость жидкости, Па·с;

$q$  - ускорение свободного падения, равное 9.81 м/с<sup>2</sup>.

Для аппарата с механическими мешалками определяющим линейным размером целесообразно принять диаметр вращающейся мешалки  $d_n$ . Так как действительную скорость движения жидкости определить трудно, то эту величину заменяют пропорциональной ей величиной – произведением  $n \cdot d_n$ , а вместо величины потери давления вводят величину потребляемой мощности. Тогда критерии динамического подобия могут быть приведены к виду:

$$K_N = \frac{N}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5}, \quad (8.5)$$

являющемуся безразмерным выражением мощности, затрачиваемой на перемешивание; центробежный критерий Рейнольдса

$$Re_n = \frac{\rho \cdot n \cdot d_n^2}{\mu}; \quad (8.6)$$

центробежный критерий Фруда

$$Fr_n = \frac{n^2 \cdot d_n}{q}, \quad (8.7)$$

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

$N$  – мощность на валу мешалки, Вт.

При условии геометрического подобия обобщенная зависимость для определения мощности на валу мешалки будет иметь вид:

$$\frac{N}{\rho \cdot n^3 \cdot d_n^5} = C * \left( \frac{\rho \cdot n \cdot d_n}{\mu} \right)^m \cdot \left( \frac{n^2 \cdot d_n}{q} \right). \quad (8.8)$$

В случае, когда в аппарате с мешалкой установлены отражательные перегородки и на поверхности однородной жидкости не образуется воронка,

влияние силы тяжести будет пренебрежительно малым и уравнение можно упростить:

$$K_N = C \cdot \text{Re}_n^m. \quad (8.9)$$

### ***Методика эксперимента***

Установка для исследования процесса перемешивания показана на рис.1. Установку приводят в действие электродвигателем постоянного тока 3. Плавное изменение частоты вращения производят с помощью тахометра, состоящего из датчика 9, жестко связанного с валом электродвигателя, и дистанционного прибора 16.

Для определения мощности, потребляемой мешалкой, используют динамометр, схема устройства которого изображена на рис.2. В зависимости от сопротивления, встречаемого мешалкой, электродвигатель поворачивается на некоторый угол так, что момент, создаваемый пружиной измерительного прибора динамометра, уравнивает момент, создаваемый мешалкой. Измеренный момент определяется по шкале приборов. Единица измерения – Н·м.

### ***Порядок проведения работы***

Опыты по определению расхода мощности на перемешивание начинают с установления «нулевого» показания динамометра, то есть показания, отвечающего холостому ходу установки. Действительное число делений шкалы динамометра, соответствующего каждой нагрузке, определяют как разность между показаниями нагруженного динамометра и «нулевым» показанием. Далее устанавливаются сосуд определенных размеров и формы, мешалка указанного размера и типа, заполняют сосуд той или иной жидкостью и замеряют ее температуру.

В условиях установившегося режима работы мешалки определяют показания динамометра при 6-8 заданных частотах вращения. Для получения результатов проводят не менее трех серий измерений, каждый раз последовательно изменяя частоту вращения.

### ***Требования безопасности труда***

Основные правила техники безопасности при проведении лабораторной работы по определению расхода энергии на перемешивание сводится к следующему:

- не допускать включения рубильника и двигателя мокрой рукой. При включении следует надевать резиновую перчатку;
- подтягивание гаек и движущих частей разрешается только при остановленной мешалке;
- электродвигатель должен быть заземлен;
- не допускается менять мешалку с включенным рубильником или двигателем;

- запрещается в момент пуска и работы электродвигателя мешалки, прикасаться к какой-либо части перемешивающего устройства;

- при пуске мешалки проверяют направление вращения двигателя. Неверное направление вращения влечет за собой искажение вертикальных потоков жидкости, а также вызывает разворачивание винтовых соединений мешалки. В этом случае электродвигатель необходимо отключить и сообщить об этом лаборанту или преподавателю; при любой неисправности двигателя (гудение, сильный нагрев, самопроизвольное изменение чисел оборотов, остановок) его необходимо выключить и сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

В случае обнаружения неисправности установки категорически запрещается включать установку в работу. Необходимо сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

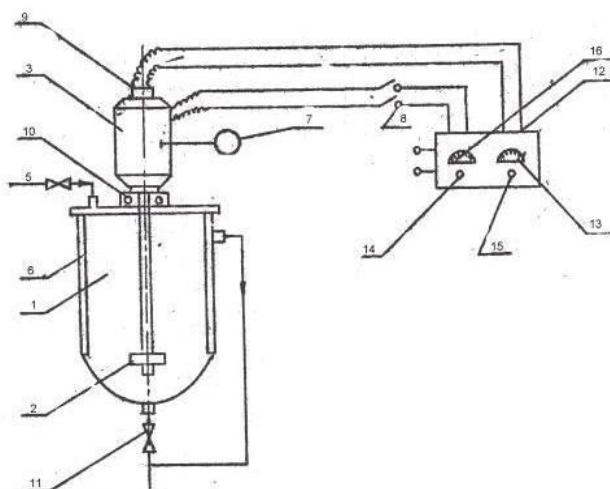


Рис.8.1 Схема установки

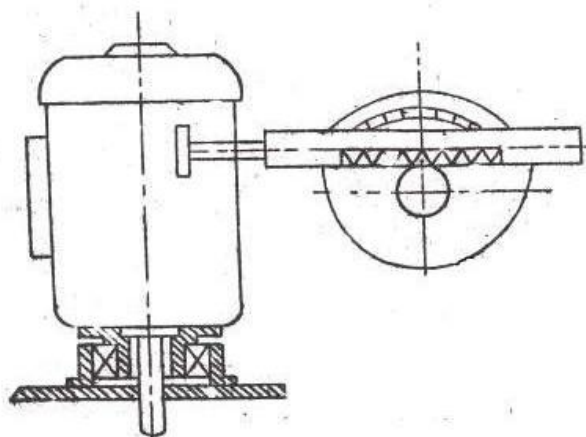


Рис. 8.2 Схема прибора для замера крутящего момента

## ***Порядок выполнения работы***

### **Задание 1**

*Теоретическое определение мощности, затрачиваемой на перемешивание*

1. Рассчитывают диаметр нормализованной мешалки, для которой отношение, м:

$$\frac{D_{ann}}{d_n} = 3; d_n = \frac{D_{ann}}{3}.$$

2. Определяют гидродинамический режим перемешивания по формуле 6:

$$Re_n = \frac{\rho \cdot n \cdot d_n^2}{\mu}.$$

3. Определяют с помощью графика значение критерия мощности  $K_N$  (приложение 2).
4. Рассчитывают мощность, потребляемую мешалкой при установлении режима 5, Вт:

$$N = K_N \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_n^5.$$

5. Результаты данного расчета мощности (N) записывают в таблицу и сравнивают с экспериментально полученными значениями (приложение 3).

### **Задание 2**

*Экспериментальное определение мощности, затрачиваемой на перемешивание*

*Оборудование и принадлежности:* электродвигатель постоянного тока; бак - объем 75 дм<sup>3</sup>, диаметр 400 мм., высота 500 мм; мешалки - рамные, якорные, пропеллерные, турбинные; тахометр; управляющий блок; термометр ртутный (шкала 0-100<sup>0</sup>С).

1. Проводят подготовку установок к выполнению опыта. Для этого прежде всего осматривают и проверяют визуальную готовность и ее комплектность (рис. 1).
2. Устанавливают отражательные перегородки 6 и мешалку 2 на вал электродвигателя 3.
3. Включают рубильник 8, тумблер 15 на блоке 12 и устанавливают по вольтметру 16 необходимое напряжение ручкой 14.
4. С помощью ручки 15 устанавливают по прибору 13 нужное число оборотов вращения 3.
5. На приборе 7 устанавливают нуль.
6. Выключают установку в обратной последовательности (см. пункт 3;4).
7. Заливают через штуцер 5 жидкость до отметки h=D.

8. Включают установку, для чего включают рубильник 8, тумблер 15 на блоке 12 и устанавливают по вольтметру 16 необходимое напряжение.
9. С помощью ручки 15 устанавливают по прибору 13 нужное число оборотов вращения электродвигателя 3.
10. Заменяют прибором 7 крутящий момент  $M_{кр}$  (Н·м).
11. Устанавливают другое число оборотов и опыт повторяют.
12. По заданию преподавателя сливают жидкость из аппарата 1 через штуцер 11 и заменяют ее жидкостью с другой вязкостью.
13. Данные, снятые с прибора 7,  $M_{кр}$  заносят в отчетную таблицу.

### **Обработка результатов эксперимента**

1. Величину  $M_{кр}$  рассчитывают по формуле:

$$M_{кр} = S_r \cdot r,$$

где  $S_r$  - сила на плече  $r$  от оси вращения, Н;  $r$  - плечо, м.

2. Экспериментальные данные по определению  $M_{кр}$  обрабатывают статистическими методами в соответствии с ГОСТ 11.004-94.

Прежде, чем найти погрешность эксперимента, необходимо сначала оценить сомнительный результат, который отбрасывается.

Оцениваем влияние совокупности значений  $x_1, x_2, x_3$  на наличие ошибочных значений, используя при этом критерии Стьюдента  $t_\alpha$ .

По формуле:

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N}{K},$$

где  $K$  - число значений опыта;

$$x_1 = M_{1кр}, x_2 = M_{2кр}; x_3 = M_{3кр}, x_N = M_{Nкр},$$

определяют среднее значение величины  $x$ , отбрасывая при этом сомнительный результат. Затем рассчитывают стандартное отклонение:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2 / K - 1}.$$

После этого находим  $t_\alpha \cdot \delta$ . Значения критерия Стьюдента для уровня достоверности  $\alpha = 95\%$  приведены в приложении 4.

Если  $x_N > x + t_\alpha \cdot \delta$  или  $x_1 < x - t_\alpha \cdot \delta$ , сомнительный результат ( $x_N$  или  $x_1$ ) можно отбросить как менее правдоподобный.

Несмещенной оценкой для генерального среднего нормального распределения является выборочное среднее (среднее арифметическое), определяется по формуле:

$$x = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i,$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_N$  - совокупность наблюдаемых значений случайной величины  $M_{кр}$ ;

$n$  - объем выборки (число измерений).

Среднеквадратичная погрешность измерений:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

Несмещенная оценка для среднеквадратичного отклонения:

$$S_1 = M_k \cdot S.$$

Значение коэффициента  $M_k$  определяется по приложению 5 в зависимости от числа измерений:  $K = n-1$ . Несмещенная оценка для дисперсии нормального распределения

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2.$$

Нижняя доверительная граница для генерального среднего:

$$a_n = \bar{x} + \frac{t_\alpha \cdot S}{\sqrt{n}},$$

где  $t_\alpha$  - квантиль распределения Стьюдента для доверительной вероятности, определяется по приложению 6:

$$\frac{t_\alpha \cdot S}{\sqrt{n}} = \varepsilon$$

- абсолютная погрешность измерения.

Относительная погрешность измерения

$$\Delta = \pm \frac{\varepsilon}{\bar{x}}.$$

Нижняя доверительная граница для среднеквадратического отклонения

$$\sigma_n = Z_n \cdot S;$$

где,  $Z_n = \frac{\sqrt{2K}}{\sqrt{2K-1} + U_\gamma}.$

Верхняя доверительная граница для среднего квадратичного отклонения:

$$\sigma_e = Z_e \cdot S;$$

где,  $Z_e = \frac{\sqrt{2K}}{\sqrt{2K-1} + U_\gamma}.$

Значения  $U_\gamma$  находятся по заданному значению доверительной вероятности  $\gamma$  по приложению 7.

### ОТЧЕТ ДОЛЖЕН СОДЕРЖАТЬ:

1. название лабораторной работы;
2. формулировку цели работы;
3. краткое описание работы;
4. расчетные формулы;
5. схемы установки;
6. отчетную таблицу;
7. график зависимости  $\lg K_N = f(\lg Re_{ш})$ ;
8. вычисленные значения показателя степени  $m$  и коэффициента  $C$  по уравнению (8);
9. вывод.

Мощность на валу мешалки определяют по формуле:

$$N = M_{кр} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n,$$

где  $N$  - мощность, Вт;

$M_{кр}$  - крутящий момент Н·м;

$n$  - частота вращения вала (мешалки), об/с.

Таким образом,

$$N = 2 \cdot \pi \cdot \kappa \cdot v \cdot L_n \cdot n,$$

где  $v$  - переводный множитель, Н/деление;

$L_n$  - показатели динамометра, деления шкалы;

$г$  - плечо, м.

Для конкретных условий опыта величина  $v$  постоянная, и, следовательно, расчетная формула для вычисления мощности на валу мешалки приводится к виду:

$$N = C \cdot L_n \cdot n.$$

Данные заносят в таблицу (приложение 3).

### **Контрольные вопросы**

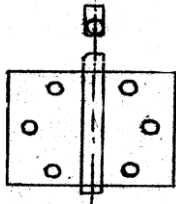
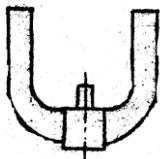
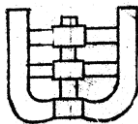
1. Дайте краткую характеристику используемых в работе приборов.
2. Почему перемешивание оказывает решающее влияние на ход различных процессов?
3. Дайте характеристику физического смысла центробежных критериев Рейнольдса, Фруда, критерия мощности.
4. Какие особенности течения жидкости при перемешивании вращающимися механическими мешалками?
5. Объясните сущность статистического метода обработки экспериментальных данных.
6. Объясните сущность проведения эксперимента для определения мощности, затрачиваемой на перемешивание.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

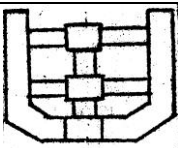
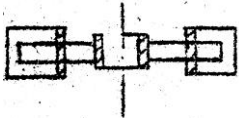
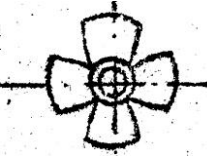
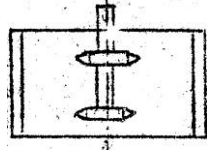
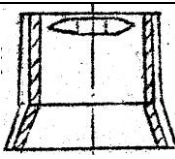
| Типы перемешивающих устройств | Эскиз                                                                             | Вместимость вертикальных аппаратов | Вязкость перемешиваемой среды | Окружающая скорость концов лопастей | Область перемешивания                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                             | 2                                                                                 | 3                                  | 4                             | 5                                   | 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Лопастные</b>              |  | 1-50                               | 0.001-0.5<br>0.05-3           | 1.5-5.0<br>1.5-3.2                  | Перемешивание взаиморастворяющихся жидкостей средней вязкости; грубое эмульгирование; взвешивание твердых частиц в жидкой среде при их концентрации до 90%; взвешивание волокнистых частиц; взмучивание легких осадков; медленное растворение кристаллических, аморфных и волокнистых веществ; выравнивание температуры среды; перемешивание при кристаллизации. |

Пропеллерные мешалки с направляющей трубой рекомендуется использовать при удлиненной форме аппарата

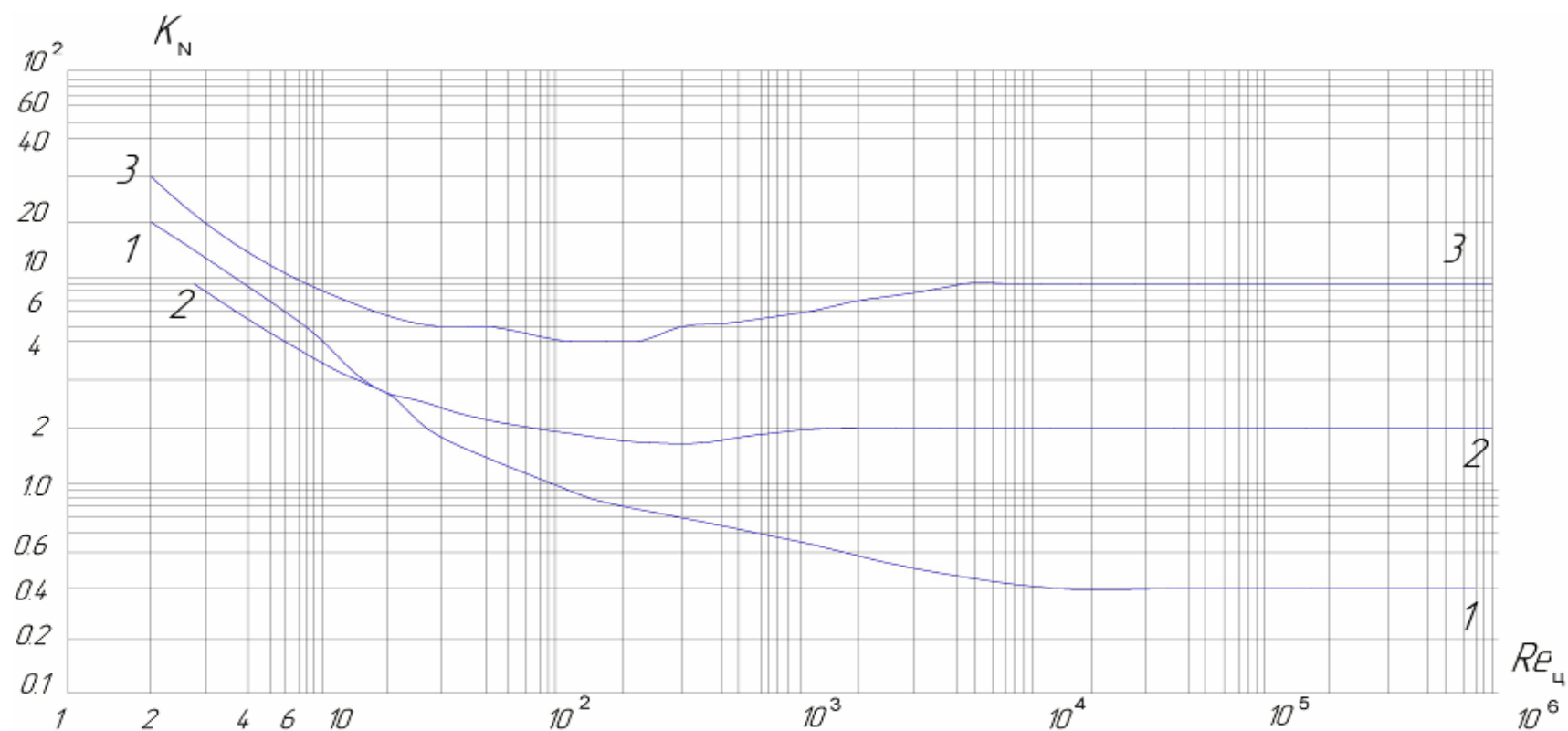
## Продолжение приложения 1

| 1                               | 2                                                                                   | 3    | 4                 | 5                   | 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Листовые</b>                 |    | 1-10 | 0.001-0.05        | 0.5-5.0             | Растворение жидкостей малой вязкости; взвешивание твердых частиц в жидкой среде; растворение кристаллических веществ; интенсификация теплообмена.                                                                                                                                                                                    |
| <b>Якорные</b>                  |    | 1-10 | 0.001-10          | 0.5-4.0             | Перемешивание вязких и тяжелых жидкостей; интенсификация теплообмена; предотвращение выпадения осадков на стенках и днищах при опасности их пригорания; взвешивание твердых частиц в вязких средах.                                                                                                                                  |
| <b>Рамные</b>                   |  | 1-50 | 0.001-10          | 0.8-7.0             | -----                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Рамные с подъемом ступицы       |                                                                                     | 1-50 | 0.001-10<br>10-40 | 0.8-7.0<br>0.8-4.0  | -----                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Турбинные закрытого типа</b> |  | 1-50 | 0.001-1<br>1-25   | 2.5-12.0<br>2.5-7.5 | Растворение и эмульгирование жидкостей (в том числе существенно различающихся по плотности); взвешивание кристаллических и аморфных твердых частиц при их концентрации до 80 %; взвешивание волокнистых частиц при их концентрации до 5%; интенсификация теплообмена; перемешивание при растворении газа в жидкости и при экстракции |

## Продолжение приложения 1

| 1                                                        | 2                                                                                   | 3            | 4                  | 5                    | 6                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Рамные</b> для аппаратов с коническим днищем          |    | 1-12.5       | 0.001-10<br>10-40  | 0.8-7.0<br>0.8-4.0   | -----                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Турбинные</b> открытого типа                          |    | 1-50         | 0.001-10<br>10-40  | 2.5-10<br>2.5-7.0    | Растворение и эмульгирование кристаллических и аморфных твердых частиц при их концентрации до 80%; взвешивание волокнистых частиц при их концентрации до 5%; выравнивание температур; перемешивание вязких жидкостей |
| <b>Пропеллерные</b>                                      |  | 1-50         | 0.001-0.1<br>0.1-4 | 3.8-16.0<br>3.8-10.0 | Растворение и эмульгирование жидкостей; взвешивание твердых частиц при их концентрации до 50%; взмучивание шламов при концентрации твердых частиц до 10% и размеров волокнистых материалов                           |
| <b>Пропеллерные с направляющей трубой или диффузором</b> |  | 1-50         | 0.001-0.1<br>0.1-4 | 3.8-16.0<br>3.8-10.0 | -----                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Пропеллерные с направляющей трубой разъемной</b>      |  | 1-50<br>1-50 | 0.1-4<br>0.1-4     | 3.8-10.0<br>3.8-10.0 | -----                                                                                                                                                                                                                |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2



Зависимость критерия мощности  $K_N$  от критерия Рейнольдса  $Re_{ц}$

для установившегося процесса перемешивания жидкостей вращающимися мешалками различных типов:

- 1- трехлопастная пропеллерная мешалка при  $D_{ан}/d_M=3$  в аппарате без перегородок; 2- восьмилопастная мешалка с прямыми лопастями ( $b=0.25 \cdot d_M$ ) под углом  $45^\circ$  при  $D_{ан}/d_M=3$  в аппарате с четырьмя перегородками;
- 3- открытая турбинная мешалка с шестью прямыми вертикальными мешалками ( $b=0.2 \cdot d_M$ ) при  $D_{ан}/d_M=3$  в аппарате с четырьмя перегородками

# ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## ОТЧЕТНАЯ ТАБЛИЦА

Диаметр сосуда  $D$  \_\_\_\_\_ м; наличие отражательной перегородки, тип \_\_\_\_\_; тип мешалки \_\_\_\_\_;  
 диаметр мешалки  $d_m$  = \_\_\_\_\_ м; среда \_\_\_\_\_; температура  $t$  = \_\_\_\_\_ °C; плотность  $\rho$  \_\_\_\_\_ кг/м<sup>3</sup>;  
 вязкость  $\mu$  \_\_\_\_\_, Па·с.

| N<br>п/п | Частота<br>об/с | Показания<br>динамометра<br>Н·м |       |       |       | Сред<br>нее<br>зна<br>чение<br>$\bar{x}$ | Абсолю<br>тная<br>погреш<br>ность<br>$\Delta x$ | Относи<br>тельная<br>погреш<br>ность<br>$\varepsilon$ | Мощность<br>(экспер.<br>данные)<br>$N$ , Вт | Крите<br>рий<br>мощности<br>$K_N$ | Кри<br>терий<br>Рейнол.<br>центроб.<br>$Re_{\text{ц}}$ | $\lg$<br>$K_N$ | $\lg$<br>$Re_{\text{ц}}$ | Мощ<br>ность<br>(расч<br>. дан<br>ные) |
|----------|-----------------|---------------------------------|-------|-------|-------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------|--------------------------|----------------------------------------|
|          |                 | $x_1$                           | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ |                                          |                                                 |                                                       |                                             |                                   |                                                        |                |                          |                                        |
| 1        |                 |                                 |       |       |       |                                          |                                                 |                                                       |                                             |                                   |                                                        |                |                          |                                        |
| 2        |                 |                                 |       |       |       |                                          |                                                 |                                                       |                                             |                                   |                                                        |                |                          |                                        |
| 3        |                 |                                 |       |       |       |                                          |                                                 |                                                       |                                             |                                   |                                                        |                |                          |                                        |
| 4        |                 |                                 |       |       |       |                                          |                                                 |                                                       |                                             |                                   |                                                        |                |                          |                                        |
| 5        |                 |                                 |       |       |       |                                          |                                                 |                                                       |                                             |                                   |                                                        |                |                          |                                        |
| 6        |                 |                                 |       |       |       |                                          |                                                 |                                                       |                                             |                                   |                                                        |                |                          |                                        |
| 7        |                 |                                 |       |       |       |                                          |                                                 |                                                       |                                             |                                   |                                                        |                |                          |                                        |
| 8        |                 |                                 |       |       |       |                                          |                                                 |                                                       |                                             |                                   |                                                        |                |                          |                                        |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### Значение критерия Стьюдента

| Число<br>степеней<br>свободы | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 7    | 10   | 15   | 20   | 30   | 50   | 100  | 90   |
|------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $t_{\alpha}$                 | 12.71 | 4.30 | 3.18 | 2.78 | 2.54 | 2.37 | 2.23 | 2.13 | 2.09 | 2.04 | 2.01 | 1.98 | 1.96 |

### Значение коэффициента Д

| К     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 10   | 15   | 20   |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $D_k$ | 1.13 | 1.69 | 2.06 | 2.33 | 2.54 | 2.53 | 2.70 | 3.08 | 3.74 |

### Значение коэффициента К

| К | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 10   | 15   | 20   |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| A | 8.00 | 1.48 | 0.77 | 0.53 | 0.41 | 0.34 | 0.23 | 0.16 | 0.12 |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

|                |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K              | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| M <sub>K</sub> | 1.253 | 1.258 | 1.085 | 1.064 | 1.051 | 1.042 | 1.036 | 1.032 | 1.028 | 1.025 |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

| K=n-1 | Значение коэффициентов t <sub>α</sub> при доверительной вероятности γ |       |       |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|-------|-------|
|       | 0.90                                                                  | 0.95  | 0.99  |
| 1     | 3.078                                                                 | 6.316 | 31.82 |
| 2     | 1.886                                                                 | 2.920 | 6.965 |
| 3     | 1.638                                                                 | 2.353 | 4.541 |
| 4     | 1.533                                                                 | 2.132 | 3.747 |
| 5     | 1.476                                                                 | 2.015 | 3.365 |
| 6     | 1.440                                                                 | 1.943 | 3.143 |
| 7     | 1.415                                                                 | 1.895 | 2.998 |
| 8     | 1.397                                                                 | 1.859 | 2.896 |
| 9     | 1.383                                                                 | 1.833 | 2.821 |
| 10    | 1.372                                                                 | 1.812 | 2.764 |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 7

| γ              | 0.90  | 0.95  | 0.99  |
|----------------|-------|-------|-------|
| U <sub>γ</sub> | 1.282 | 1.645 | 2.326 |

## ЛИТЕРАТУРА

### Основная

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: ООО «ИД Альянс», 2009. – 753 с.
2. Разинов А. И. Процессы и аппараты химической технологии [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. И. Разинов, А. В. Клинов, Г. С. Дьяконов. - Электрон. текстовые данные. - Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2017. - 860 с. - 978-5-7882-2154-0. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/75637.html>
3. Смаль Д. В. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 1 [Электронный ресурс] : учебное пособие / Д. В. Смаль, А. В. Черкасов, Ю. Н. Осипов. - Электрон. текстовые данные. - Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2016. - 77 с. - 2227-8397. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/80521.html>

### Дополнительная

4. Лащинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчёта химической аппаратуры: Справ. 2-е изд. – М.: Изд. «Альянс», 2013. – 384с.
5. Романков П.Г., Павлов К.Ф., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. М: ООО «ИД Альянс», 2006 г. – 576 с.
6. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию. Под ред. Ю.И. Дытнерского. М.: ООО «ИД Альянс», 2008. - 496 с.
7. Фролов В.Ф., Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии» СПб.: Химиздат, 2003. – 608 с.
8. Косой В. Д., Рожков В.А. Пособие для лабораторных работ по курсу «Гидравлика». – М.: ДеЛи принт, 2007. – 216с.
9. Основы проектирования химических производств: учебник для вузов/ В.И. Косинцев, ред. А.И. Михайличенко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2008. - 332с.
10. Перемешивание в химической промышленности/ пер. с Косой В. Д., Рожков В.А. Гидравлика. – М.: ДеЛи принт, 2008. – 495с.
11. Кудинов А.А. Газодинамика: Учеб. пособие. – М.: Инфра – М, 2011. – 336с.
12. Курсовое проектирование по процессам и аппаратам химической технологии. Теплообменные аппараты и ректификационные установки: учеб. пособие/Ю.Я. Печенегов, Р.И. Кузьмина; Саратовский гос. техн. ун-т (Саратов) – Саратов: Из-во «Саратовский источник», 2013 – 110с.

### **Интернет-ресурсы**

13. <http://www.iprbookshop.ru>

### **Источники ИОС**

14. <http://techn.sstu.ru>