

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт горного дела и строительства  
Кафедра «Санитарно-технические системы»

Утверждено на заседании кафедры  
«Санитарно-технические системы»  
«20» января 2022 г., протокол № 6

Заведующий кафедрой

 Р.А. Ковалев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по выполнению лабораторных работ**  
**по дисциплине (модулю)**  
**«Гидравлика в строительстве»**

**основной профессиональной образовательной программы**  
**высшего образования – программы бакалавриата**

по направлению подготовки  
**08.03.01 – "Строительство"**

с профилем  
**"Промышленное и гражданское строительство"**

Форма(ы) обучения: очная, очно-заочная

Идентификационный номер образовательной программы: 080301-05-22

Тула 2022 год

**Разработчик(и) методических указаний**

Белоусов Р.О., доцент, к.т.н., доцент  
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)



---

(подпись)

## ВВЕДЕНИЕ

Гидравлика – отрасль механики, изучающая законы равновесия и движения жидкости.

Теоретическое изучение движения жидкости и газа, заключающееся в составлении дифференциальных уравнений движения и точном их решении в общем виде, возможно только в некоторых простейших случаях. В остальных случаях, имеющих практическое значение, при решении задач движения жидкости и газа приходится или вносить различные допущения, или принимать рабочие гипотезы (как на стадии составления уравнений движения жидкости или газа, так и на стадии их решения). Следовательно, полученные решения должны быть или проверены, или скорректированы гидравлическими экспериментами. Эксперименты позволяют уточнить полученные расчетом формулы, дают возможность вносить в них поправки, делая эти формулы пригодными для надежных технических расчетов. Значение эксперимента в изучении гидравлики особенно велико, когда из-за большой сложности движение жидкости и газа вообще не поддается теоретической схематизации, и задача решается чисто опытным путем.

Вся история развития гидравлики от глубокой древности до наших дней тесно связана с экспериментальными исследованиями частных случаев движения жидкости с использованием их результатов в практике (Архимед – плавание тел в жидкости, Леонардо да Винчи – гидравлический пресс, центробежный насос, истечение жидкости через отверстия и водосливы, Галилео Галилей – изучение и использование вакуума и т.д.).

Широко известные в гидравлике явления были впервые открыты экспериментально: ламинарный и турбулентный режимы течения (Г. Гаген, Е. Пуазель, О. Рейнольдс), образование вихрей при обтекании тел потоком жидкости или газа (Н.Е. Жуковский, Т. Карман, Л. Прандтль) и др. В конце XIX века начали создаваться специальные гидравлические лаборатории, в которых экспериментально исследуют не только отдельные элементы, но и целые взаимосвязанные гидравлические явления, представляющие интерес для гидротехники, судоходства и гидромашиностроения. С тех пор объем рассматриваемых в них задач растет, а надежность полученных результатов увеличивается.

Основной метод исследований в гидравлике состоит в целесообразном сочетании теории и эксперимента, что позволяет изучать практически любые случаи движения жидкости и получать с необходимой точностью решения многообразных технических задач.

Лабораторные работы по дисциплине «Гидравлика в строительстве» предназначены для ознакомления студентов с методикой проведения экспериментальных исследований различных гидравлических явлений и с методами определения экспериментальных коэффициентов, используемых в гидравлических расчетах.

Лабораторный практикум составлен применительно к оборудованию гидравлической лаборатории кафедры СТС Тульского государственного университета и соответствует действующей рабочей программе дисциплины «Гидравлика в строительстве». Все лабораторные работы, выполняемые студентами, распределены по четырем разделам:

1. Измерение характеристик жидкости и их потоков (измерение давления и местной скорости в разных точках пространства, занятого покоящейся или движущейся жидкостью, и расхода напорного или безнапорного потока). Ознакомившись с конструкциями и принципами действия различных приборов, студент приобретает навыки работы с некоторыми типами приборов, установленными в учебной лаборатории.
2. Опытная демонстрация потоков жидкостей и газов (визуальное наблюдение и изучение ламинарного и турбулентного режимов, построение пьезометрической и напорной линий потока жидкости в трубе переменного сечения). Студент знакомится с движением отдельных частиц в потоке жидкости или газа и законами изменения вдоль потока средней скорости и давления.
3. Опытное определение коэффициентов, используемых в гидравлических расчетах (коэффициенты, учитывающие сопротивление среды движения жидкости: гидрав-

лического трения  $\lambda$ , местного сопротивления  $\zeta$ , скорости  $\varphi$ , сжатие струи  $\varepsilon$ , расхода  $\mu$ , фильтрации  $\kappa$ ). Студент знакомится с методикой и технологией проведения экспериментов для определения численного значения искомого коэффициента и изучением причин, приводящих к изменению его величины.

В учебное пособие включены основные сведения о методах обработки результатов эксперимента и оценки достоверности и надежности полученных результатов.

Перед лабораторными занятиями студент обязан ознакомиться с настоящим пособием, соответствующими разделами лекций и учебников, усвоить изложенный в них материал и заготовить бланк отчетного журнала к лабораторной работе.

Контрольные вопросы разделены на две группы: общие – для всех лабораторных работ и частные, - относящиеся только к конкретной лабораторной работе.

Первая группа контрольных вопросов следующая:

1. Конечная цель лабораторной работы и основные пути достижения ее.
2. Схема опытной установки и назначение каждого прибора, арматуры или элемента лабораторной установки.
3. Возможность (или невозможность) замены прибора, имеющегося на лабораторной установке, другими.
4. Последовательность (или одновременность) работы с арматурой установки и производства отсчетов по приборам.
5. Правила заполнения журнала регистрации опытных данных.
6. Расчетные формулы, применяемые при обработке результатов измерений по приборам лабораторной установки.
7. Смысл и размерности всех величин, входящих в формулы, используемые при обработке результатов наблюдений.

Дополнительные контрольные вопросы, относящиеся к конкретной лабораторной работе, приведены в конце ее описания.

При защите выполненной лабораторной работы студент сдает полностью заполненный результатами измерений и расчетов и соответствующими схемами и графиками бланк отчетного журнала.

## 1. ЗАКОНЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ И ПРАВИЛА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ.

Проведение гидромеханического эксперимента позволяет изучить гидравлическое явление (например, для создания рабочей гипотезы), получить значение опытного коэффициента (для корректирования теоретически полученной формулы) или выявить эмпирическую формулу. Для того, чтобы можно было использовать полученные результаты для решения не только конкретно поставленной инженерной задачи, но и для многих других, аналогичных и могущих появиться впоследствии, необходимо, чтобы эксперимент был выполнен в строгом соответствии с законами гидромеханического подобия потоков, а модели были построены согласно правилам моделирования натуральных объектов.

### 1.1 Виды подобия потоков

Гидромеханическое подобие включает три вида подобия:

1. Геометрическое подобие – все сходственные линейные размеры натурального объекта  $l_n$  и его модели  $l_m$  находятся в одинаковом соотношении:

$$\frac{l_m}{l_n} = \delta_e = idem, \quad (1)$$

где  $\delta_e$  – геометрический масштаб моделирования.

При геометрическом подобии (рис. 1) обеспечиваются безусловное подобие поверхностей, ограничивающих потоки, подобие линий тока и траекторий, отношение сходственных площадей  $\delta_\omega = \delta_e^2$  и объемов  $\delta_w = \delta_e^3$ .

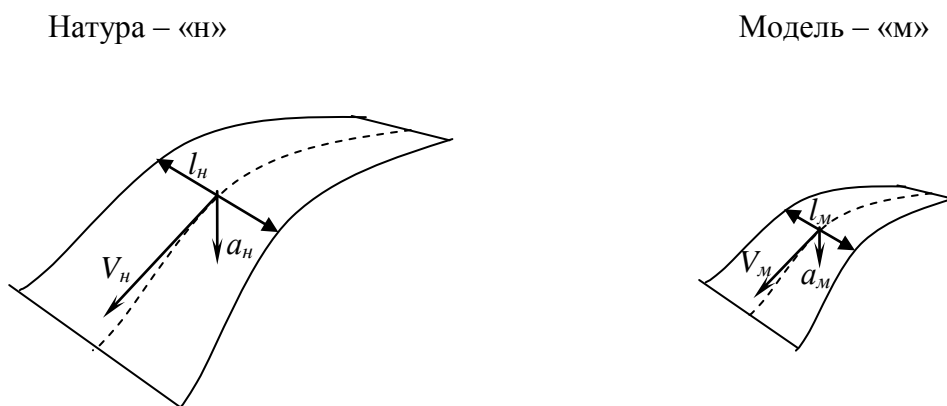


Рисунок 1

2. Кинематическое подобие – во всех сходственных точках скорости  $V$  и ускорения  $a$  не только имеют одинаковые к потоку направления, но и находятся в одинаковом соотношении:

$$\frac{V_n}{V_m} = \delta_v = idem; \quad \frac{a_n}{a_m} = \delta_a = idem, \quad (2)$$

где  $\delta_v$ ,  $\delta_a$  – масштабы скорости и ускорения.

Заметим, что кинематическое подобие возможно только при наличии геометрического подобия.

Если ввести масштаб времени  $\delta_m$ , то можно получить масштабы кинематических величин:

$$\delta_v = \frac{\delta_e}{\delta_t}, \quad \delta_a = \frac{\delta_e}{\delta_t^2}. \quad (3)$$

3. Динамическое подобие – результирующие  $P$  всех действующих сил на сходственные элементы не только имеют одинаковые к потоку направления (многоугольники действующих в натуре и на модели сил подобны), но и находятся в одинаковом отношении:

$$\delta_P = \frac{P_n}{P_m} = idem, \quad (4)$$

где  $\delta_P$  – масштаб сил.

Заметим, что динамическое подобие возможно только при наличии кинематического подобия.

## 1.2 Основной закон подобия потоков (закон Ньютона)

Масштабные коэффициенты  $\delta_e, \delta_t, \delta_\rho$  не могут быть произвольными; связь между ними определяется законом Ньютона, записанным для элемента:

в натуре  $P_n = \rho_n W_n a_n$ ;

и на модели  $P_m = \rho_m W_m a_m$

(сила равна произведению массы на ускорение).

Тогда

$$\delta_P = \delta_\rho \delta_e^3 \frac{\delta_e}{\delta_t^2} = \delta_\rho \delta_e^2 \delta_v^2$$

и закон Ньютона приобретает вид:

$$\frac{\delta_P}{\delta_\rho \delta_e^2 \delta_v^2} = 1. \quad (5)$$

Безразмерная величина

$$\frac{P}{\rho l^2 V^2} = Ne \quad (6)$$

получила название критерия подобия Ньютона (числа Ньютона).

Закон подобия формулируется так: два геометрически подобных потока будут и гидромеханически подобны, если каждая пара сходственных элементов имеет одинаковые числа Ньютона т.е.:

$$Ne_n = Ne_m. \quad (7)$$

Заметим, что разные пары сходственных элементов (точек, площадей, объемов и т.п.) могут иметь разные числа Ньютона.

## 1.3 Частные критерии подобия потоков

Внешние силы (тяжести, вязкости, упругости, поверхностного натяжения и т.п.), действующие на сходственные элементы потоков в натуре и на модели в силу своей физической природы изменяются при моделировании в разное число раз. Следовательно, многоугольники этих сил для сходственных элементов в принципе не могут быть подобными, а их равнодействующие – одинаково ориентированными к потоку и находиться в одинаковом соотношении по своим величинам.

Таким образом, полного динамического (следовательно, и гидромеханического) подобия в общем случае быть не может, и закон Ньютона не выполним.

Однако существует довольно большой класс гидравлических потоков, явлений, характер которых зависит только от одной силы (влияние других сил или совсем отсутствует, или настолько мало, что им можно без существенной погрешности пренебречь). В зависимости от типа доминирующей (определяющей характер изучаемого явления) силы из-

менится вид закона подобия (5) и критерия подобия (6). Они получили название частных законов и критериев подобия. Каждый такой случай можно рассматривать как подобие при равенстве соотношений пары типов физических сил, одна из которых является силой инерции, а вторая – доминирующей силой в данном частном случае движения жидкости или газа:

1. Доминирующая сила – сила тяжести  $G = \rho g W$  или масштаб силы  $\delta_G = \delta_\rho \delta_g \delta_t^3$ , и тогда закон гравитационного подобия будет записан при  $\delta_\rho = 1$  так:

$$\frac{\delta_v^2}{\delta_g \delta_l} = 1 \quad (8)$$

Безразмерная величина

$$\frac{V^2}{gl} = Fr \quad (9)$$

называется критерием подобия (числом) Фруда.

2. Доминирующая сила – сила вязкости  $P = \rho v \omega \frac{d_u}{d_n}$  или масштаб силы  $\delta_P = \delta_\rho \delta_v \delta_l \delta_v$ , и закон вязкостного подобия будет выражен следующим образом:

$$\frac{\delta_v \delta_l}{\delta_v} = 1 \quad (10)$$

Безразмерная величина

$$\frac{Vl}{\nu} = Re \quad (11)$$

называется критерием подобия (числом) Рейнольдса.

3. Доминирующая сила – сила давления  $P = p \omega$  или масштаб силы  $\delta_P = \delta_p \delta_e^2$ , и закон подобия по давлению будет таким:

$$\frac{\delta_\rho \delta_v^2}{\delta_p} = 1 \quad (12)$$

Безразмерная величина

$$\frac{\rho V^2}{P} = Eu \quad (13)$$

называется критерием подобия (числом) Эйлера.

4. Доминирующая сила – сила упругости  $P = E_{жс} \omega$ , а при одинаковой относительной деформации на модели и в натуре ( $\delta_\varepsilon = 1$ ) масштаб силы  $\delta_P = \delta_{E_{жс}} \delta_e^2$  и закон упругостного подобия будет представлен так:

$$\frac{\delta_\rho \delta_v^2}{\delta_E} = 1 \quad (14)$$

Безразмерная величина

$$\frac{\rho V^2}{E_{жс}} = C_o \quad (15)$$

называется критерием подобия (числом) Коши.

5. Доминирующая сила – сила поверхностного натяжения  $P = \sigma_{nn} l$  или масштаб силы  $\delta_P = \delta_\sigma \delta_l$ , и закон подобия по поверхностному натяжению будет записан как

$$\frac{\delta_\rho \delta_l \delta_v^2}{\delta_\sigma} = 1 \quad (16)$$

Безразмерная величина

$$\frac{\rho l V^2}{\sigma_{nn}} = W \quad (17)$$

называется критерием подобия (числом) Вебера.

6. Доминирующая сила – выталкивающая сила  $P = (\rho_{TB} \rho_{ж}) g W$  или масштаб силы  $\delta_P (\delta_{\rho_{TB}} - \delta_{\rho_{ж}}) \delta_g \delta_l^3$ , и закон подобия по выталкивающей силе будет записан так:

$$\frac{\delta_v^2}{\delta_g \delta_l} \cdot \frac{\delta_\rho}{(\delta_{\rho_{TB}} - \delta_\rho)} = 1 \quad (18)$$

Безразмерная величина

$$\frac{V^2}{gl} \cdot \frac{\rho}{\rho_{TB} - \rho} = Ar \quad (19)$$

называется критерием подобия (числом) Архимеда.

Существуют и другие частные критерии подобия, например:

-Кармана  $Ka = \frac{B_v}{V}$  - для изучения пульсаций турбулентного потока;

-Струхала  $Sh = \frac{l}{Vt}$  - для изучения неустановившихся течений;

-Маха  $M = \frac{V}{a}$  - для моделирования течения газа;

-Грасгофа  $Gr = \frac{gl^3}{\nu^2}$  - для изучения конвекционного движения воздуха.

Частный закон подобия потоков может быть сформулирован следующим образом: два геометрически подобных потока или явления, происходящих под воздействием только одной силы, будут и гидромеханически подобны, если каждая пара сходственных элементов будет иметь одинаковые соответствующие критерии (числа) подобия.

#### 1.4. Основные правила моделирования потоков

При изготовлении модели основной величиной становится геометрический масштаб моделирования  $\delta_l$ . Чем больше  $\delta_l$  (чем меньше размер модели по сравнению с натурой), тем опыт дешевле. Но произвольно малую модель изготовить нельзя, так как обязательно должны быть выполнены следующие условия:

1. Размеры модели не должны создавать условия, при которых возможно не только изменение вида доминирующей силы, но и заметное (вернее, недопустимое) влияние двух или нескольких других сил.

2. При изучении граничных условий течения должно быть соблюдено не только равенство относительных шероховатостей модели и природы, но и геометрическое подобие натурной шероховатости.

3. Потоки в натуральных и модельных условиях в сходственных местах должны иметь одинаковые режимы течения (ламинарный или турбулентный), состояния потока жидкости (бурное или спокойное), скорости потока (дозвуковое или сверхзвуковое).

4. При моделировании явлений, связанных с кавитацией, должны быть предусмотрены условия для моделирования атмосферного давления на модели.

5. Размеры и конструкция измерительных приборов и устройств, применяемых при изучении модельного потока, не должны вносить заметных изменений в его характер.



### 1.5. Пересчет данных опыта на данные натуры.

При выполнении гидромеханических опытных исследований на моделях измеряют различные геометрические, кинематические и динамические величины и определяют опытные и поправочные коэффициенты (в общем случае, величины  $K_m$ ).

Задача заключается в том, чтобы по известной величине  $K_m$  вычислить соответствующую величину  $K_n$  в сходственной точке на натурном потоке, то есть

$$K_n = K_m \delta_k \quad (20)$$

где  $\delta_k$  - безразмерный масштабный множитель искомой величины  $K$ .

Величина пересчетного коэффициента  $\delta_k$  зависит от типа доминирующей силы (частного критерия и закона подобия потоков), рода жидкости в натуре и на модели ( $\delta_\rho$ ,  $\delta_\nu$ ,  $\delta_{E_{ж}}$ ) и масштаба моделирования  $\delta_l$ . Заметим, что в общем случае при всех прочих равных условиях величина пересчетного коэффициента  $\delta_k$  зависит и от вида пересчитываемой величины  $K$ .

*Пример.* Дисковый затвор (рис.2), установленный в водоводе диаметром  $D_n=1500$  мм, испытывается на модели в трубе  $D_m=150$  мм путем продувки ее воздухом.

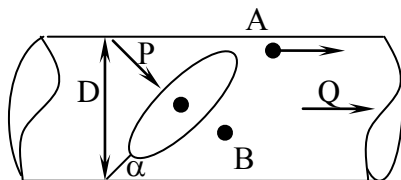


Рисунок 2

Плотность и вязкость среды :

- в натуральных условиях (вода)  $\rho_n = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $\nu_n = 0,01 \text{ см}^2/\text{с}$ ;
- на модели (воздух)  $\rho_n = 1,2 \text{ кг/м}^3$ ;  $\nu_n = 0,156 \text{ см}^2/\text{с}$ ;

Возникают две последовательно решаемые задачи:

1. Определить расход воздуха на модели  $Q_m$ , моделирующей пропуск в натуре расхода воды  $Q_n = 2 \text{ м}^3/\text{с}$ .

*Решение.* В случае напорного движения жидкости или газа доминирующими силами, определяющими распределение скоростей, очертание траекторий и т.п., являются силы вязкости жидкости или газа. Поэтому в рассматриваемом примере моделирование следует проводить по частному закону вязкостного подобия потоков, то есть по равенству чисел Рейнольдса сходственных элементов в натуральных и модельных условиях  $Re_n = Re_m$ .

По условиям поставленной задачи:

$$\text{- масштаб моделирования } \delta_l = \frac{D_n}{D_m} = \frac{1500}{150} = 10;$$

$$\text{- масштаб вязкости } \delta_\nu = \frac{\nu_n}{\nu_m} = \frac{0,01}{0,156} = 0,0641;$$

$$\text{- масштаб плотности } \delta_\rho = \frac{\rho_n}{\rho_m} = \frac{1000}{1,2} = 833;$$

Из закона вязкостного подобия  $\frac{\delta_\nu \delta_l}{\delta_\rho} = 1$  находим, что масштаб скорости

$$\delta_v = \frac{\delta_v}{\delta_l} = \frac{0,0641}{10} = 0,00641.$$

Расход потока  $Q$  может быть вычислен по формуле

$$Q = V\omega,$$

т.е. масштаб расхода  $\delta_Q = \delta_v \delta_l^2 = 0,00641 \cdot 10^2 = 0,641$ .

Окончательный искомый расход воздуха на модели дискового затвора

$$Q_M = \frac{Q_H}{\delta_Q} = \frac{2}{0,641} = 3,12 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

2. При продувке воздухом с расходом  $Q_M = 3,12 \text{ м}^3 / \text{с}$  модели дискового затвора, расположенного к оси трубы под углом  $\alpha$ , экспериментально замерены следующие величины:

- скорость потока в точке  $A$   $u_M = 207 \text{ м} / \text{с}$  ;
- потери напора (давления)  $h_{П.М} = 216 \text{ мм вод. ст.}$ ;
- разряжение в точке  $B$   $P_{B.М} = 30 \text{ Па}$ ;
- сила воздействия потока на ось затвора  $P_M = 80 \text{ Н}$ ;
- момент силы воздействия потока на диск затвора  $M_M = 2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Определить значение этих же величин на натурном водоводе при таком же угле  $\alpha$  поворота дискового затвора ( $\alpha_H = \alpha_M$ ).

*Решение.* Скорость потока воды в точке  $A$  натурального трубопровода найдем так:

$$u_H = u_M \delta_v = 207 \cdot 0,00641 = 1,32 \text{ м} / \text{с}.$$

Потери напора  $h_{П}$  могут быть вычислены по формуле

$$h_{П} = \zeta \frac{V^2}{2g},$$

т.е. в масштабных множителях  $\delta_{П} = \delta_{\zeta} \frac{\delta_v}{\delta_g}$ .

При моделировании по числу Рейнольдса  $\delta_{\zeta} = 1$  местоположение натурны и модели позволяет принять  $\delta_g = 1$ .

Следовательно,  $\delta_{П} = 0,00641^2 = 0,41 \cdot 10^{-4}$ .

Потери напора, замеренные на модели, выразим высотой столба воздуха:

$$h_{ПМ} = 216 \text{ мм вод.ст.} \cdot \frac{\rho_H}{\rho_M} = 0,216 \cdot \frac{1000}{1,2} = 180 \text{ м возд.ст.}$$

Потери напора в натуре будут следующими:

$$h_{ПН} = h_{ПМ} \delta_{П} = 180 \cdot 0,41 \cdot 10^{-4} = 0,007 \text{ м вод.ст.}$$

Сила вязкостного трения

$$P = \rho v \frac{dV}{dy} \omega$$

т.е. в масштабных множителях  $\delta_P = \delta_{\rho} \delta_v \frac{\delta_v}{\delta_l} \delta_l^2$  или окончательно

$$\delta_P = \delta_{\rho} \delta_v^2 = 833 \cdot (0,00641)^2 = 3,42.$$

Следовательно, сила давления потока воды на ось затвора в натуральных условиях будет составлять

$$P_H = P_M \delta_P = 80 \cdot 3,42 = 274 \text{ Н}$$

Момент силы воздействия потока

$$M = Pl$$

т.е. в масштабных множителях  $\delta_M = \delta_P \delta_l = 3,42 \cdot 10 = 34,2$ ,

следовательно, момент силы воздействия потока воды на дисковый затвор в натуральных условиях будет

$$M_H = \delta_M M_M = 34,2 \cdot 2 = 68,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Манометрическое или вакуумметрическое давление

$$P = \frac{P}{\omega},$$

т.е. в масштабных множителях  $\delta_P = \frac{\delta_P}{\delta_l^2} = \frac{34,2}{10} = 0,342$ .

Разряжение в точке В потока воды в натуральных условиях

$$P = \delta_P P_M = 0,342 \cdot 30 = 10,3 \text{ Па}.$$

Результаты расчетов представим в табличной форме (табл.1).

Таблица 1.

Величина	Модель	Масштабный множитель	Натура
Линейные размеры	-	10	-
Вид жидкости	Воздух	-	Вода
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1,2	833	1000
Кинетический коэффициент вязкости $\nu$ , см <sup>2</sup> /с	0,156	0,0164	0,01
Скорость потока $V$ , м/с	207	0,00641	1,32
Разряжение $P_{\text{вак}}$ , Па	30	0,342	10,3
Расход потока $Q$ , м <sup>3</sup> /с	3,12	0,641	2,0
Потери напора $h_m$ , м вод.ст.	0,216	$0,41 \cdot 10^{-4}$	0,007
Сила $P$ , Н	80	3,42	274
Момент силы $M$ , Н·м	2	34,2	68,4

## 2.ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ОПРЕДЕЛЕННЫХ ВЕЛИЧИН.

В процессе проведения опыта осуществляются прямые замеры тех или иных величин по различным приборам, проградуированным в соответствующих единицах измерения.

Любые многократные измерения одной и той же величины обычно отличаются друг от друга. Следовательно, каждое из измерений  $\alpha_i$  не совпадает с истинным значением  $\alpha_0$ , т.е. содержит абсолютную ошибку измерения (погрешность измерения):

$$\delta_i = \alpha_i - \alpha_0 \quad (21)$$

Величину ошибки принято оценивать и в относительном виде как отношение абсолютной ошибки  $\delta_i$  к истинному значению измеряемой величины  $\alpha_0$ , т.е.,

$$\varepsilon_i = \pm \frac{\delta_i}{\alpha_0} * 100\% \quad (22)$$

Сложность оценки ошибки измерения заключается в том, что обычно оказываются неизвестными не только абсолютная  $\delta_i$  или относительная  $\varepsilon_i$  ошибки, но и само истинное значение измеряемой величины  $\alpha_0$ .

### 2.1 Виды ошибок измерения.

Различают следующие виды ошибок измерения: грубые, систематические и случайные.

Грубые ошибки (промахи) возникают вследствие нарушения основных условий измерения (например, неправильно оценена цена деления прибора) или в результате ошибки недосмотра экспериментатора (например, отсчет записан в другую графу журнала). Внешним признаком результата, содержащего грубую ошибку, является его резкое отличие по величине от результатов остальных измерений. При обнаружении грубой ошибки такой результат измерения следует сразу же отбросить.

Систематические ошибки возникают вследствие причин, одинаковых при каждом измерении одной и той же величины (например, неточность градуировки шкал приборов, влияние температуры на упругие элементы приборов и т.п.). Систематические ошибки перед измерением должны быть обязательно выявлены и по возможности исключены или, по крайней мере, значительно уменьшено их влияние на величину отсчета по прибору (проверкой приборов, совершенствованием методов снятия отсчета, внесением поправок в результаты измерений и т.п.).

Случайные ошибки вызываются суммарным воздействием большого количества отдельных факторов, эффект действия каждого из которых настолько незначителен, что их нельзя выделить и учесть в отдельности. Они не имеют какой-либо определенной закономерности и могут быть с разными знаками. Случайные ошибки часто называют «шумом эксперимента». Случайные ошибки являются неустранимыми, их нельзя исключить в каждом отдельном измерении, но, проводя серию измерений, можно, воспользовавшись методами теории вероятности, учесть их влияние на оценку истинного значения измеряемой величины. Такой прием позволит определить значение измеряемой величины со значительно меньшей ошибкой, чем ошибки отдельных измерений. Случайные ошибки, как правило, подчиняются нормальному закону распределения случайных величин (закону Гаусса), т.е. малые по величине абсолютные погрешности появляются значительно чаще больших; положительные же погрешности появляются также часто, как и равные им по абсолютной величине отрицательные погрешности.

## 2.2 Оценка точности измерений по приборам.

В соответствии с законами теории вероятности оценку точности и достоверности проведенных измерений искомой величины можно выполнить следующими приемами:

1. Определить доверительный интервал  $\delta_{\text{дов}_i}$  отличающий результат эксперимента от истинного значения измеряемой величины.
2. Определить требуемое количество измерений  $n$  для обеспечения заданной точности эксперимента.
3. Дать вероятностную оценку точности измерений заданной величины.

Многokrатно ( $n$  раз) повторенное измерение данной величины  $\alpha_i$  позволяет получить ее среднее арифметическое значение  $\alpha_{cp}$  из всех результатов.

$$\alpha_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{n}, \quad (23)$$

которое в соответствии с теорией вероятности случайных величин хотя и не является точным значением измеряемой величины  $\alpha_0$ , но может считаться наиболее вероятным значением ее.

Как правило, при оценке точности измерений заданной величины требуется определить не ошибки отдельных измерений  $\delta_i$  или  $\varepsilon_i$ , а отклонение среднего арифметического результатов измерений  $\alpha_{cp}$  от истинного значения измеряемой величины (так называемую погрешность результата):

$$\delta_{cp} = \alpha_{cp} - \alpha_0 \quad (24)$$

Оценка степени приближения  $\alpha_{cp}$  и  $\alpha_0$  может быть выполнена с помощью эмпирического стандарта погрешности:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_{cp})^2} \quad (25)$$

Он используется вместо средней квадратической ошибки в тех случаях, когда неизвестно истинное значение измеряемой величины, а определено лишь среднее арифметическое ее значение  $\alpha_{cp}$ .

В соответствии с законами теории вероятности доверительный интервал (от  $\alpha_{cp} - \delta_{ДОВ}$  до  $\alpha_{cp} + \delta_{ДОВ}$ ), с которой заданной вероятностью  $P$  попадает истинное значение измеряемой величины  $\alpha_0$  (т.е.  $\alpha_{cp} - \delta_{ДОВ} \leq \alpha_0 \leq \alpha_{cp} + \delta_{ДОВ}$ ), удовлетворяет условию

$$|\delta_{ДОВ}| \leq t(P; n) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (26)$$

где  $t(P; n)$  – безразмерный множитель, зависящий от доверительной вероятности  $P$  (надежности оценки) и от числа измерений  $n$  и определяемый по таблицам, составленным с помощью распределения Стьюдента.

Увеличив количество измерений даже при неизменной их точности, можно или повысить надежность  $P_{ДОВ}$ , или сузить доверительный интервал  $\delta_{ДОВ}$  истинного значения измеряемой величины. Количество измерений, которое должно быть выполнено с тем, чтобы с требуемой надежностью  $P$  гарантировать доверительный интервал  $\delta_{ДОВ}$ , может быть определено только в том случае, если хотя бы по нескольким измерениям  $n_1 < n$  будет найдена величина  $\sigma_1$ . Тогда

$$n > \left[ \frac{t(P; n_1)}{|\delta_{ДОВ}|} \sigma_1 \right]^2 \quad (27)$$

Из формулы (27) следует широко используемое правило: для того, чтобы уменьшить доверительный интервал  $\delta_{ДОВ}$  в  $k$  раз, необходимо увеличить число измерений в  $k^2$  раз. Для вероятностной оценки точности измерений могут быть использованы следующие понятия теории вероятности:

- вероятная ошибка измерения

$$\delta_e = \pm 2/3 \sigma \quad (28)$$

- максимальная доверительная ошибка измерения

$$\delta_{\max} = \pm \frac{3\sigma}{\sqrt{n}} \quad (29)$$

Таким образом, эмпирический стандарт погрешности  $\sigma$  является основной величиной, используемой во всех способах оценки точности измерения случайной величины, когда ее истинное значение неизвестно.

При выполнении прямых измерений различных величин важно установить, как разумную точность используемых приборов, так и разумное число измерений каждой величины, так как излишняя точность приборов и количество измерений удорожают эксперимент, стоимость которого должна соответствовать стоимости полученного экспериментального результата.



Среднее арифметическое значение отсчета по пьезометру

$$P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{20} P_i}{20} = \frac{22945}{20} = 1147,25 \text{ мм}$$

Эмпирический стандарт погрешности отсчета по пьезометру

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (P - P_{cp})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{33,75}{20-1}} = 1,3328 \text{ мм}$$

Приступим к вероятностной оценке результатов измерения.

1. Определим доверительный интервал.

По таблице «Распределение Стьюдента» при  $P = 0,99$  и  $k = n - 1 = 20 - 1 = 19$  найдем

$$t(P, n) = 2,878 - \frac{2,878 - 2,845}{2} \cdot 1 = 2,862$$

Тогда доверительный интервал

$$\delta_{\text{ДОВ}} = \pm t(P; n) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \pm 2,862 \frac{1,3328}{\sqrt{20}} = \pm 0,8529 \text{ мм}$$

С вероятностью 99 % истинное значение давления  $P$  находится в интервале показаний пьезометра от  $P_{cp} - \delta_{\text{ДОВ}} = 1147,25 - 0,8529 = 1146,397 \text{ мм}$

до  $P_{cp} + \delta_{\text{ДОВ}} = 1147,25 + 0,8529 = 1148,103 \text{ мм}$ , т.е.  $1146,397 \text{ мм} \leq P \leq 1148,103 \text{ мм}$

2. Определим количество измерений  $n_1$ , при котором с той же вероятностью доверительный интервал  $\delta_{\text{ДОВ}} = \pm 0,7 \text{ мм}$ :

$$n_1 > \left[ \frac{t(P; n)}{\delta_{\text{ДОВ}}} \sigma_1 \right]^2 = \left[ \frac{2,862}{0,7} \cdot 1,3328 \right]^2 = 30,2$$

Примем требуемое количество отсчетов  $n_1 = 31$  раз.

3. Произведем вероятностную оценку результатов измерения:

- вероятная ошибка измерений давления  $P$

$$\delta_e = \pm \frac{2}{3} \sigma = \frac{2}{3} \cdot 1,3328 = 0,888 \text{ мм};$$

- максимальная доверительная ошибка измерений давления  $P$

$$\delta_{\text{max}} = \pm \frac{3\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{3 \cdot 1,3328}{\sqrt{20}} = 0,8921 \text{ мм};$$

- относительная ошибка измерений давления  $P$

$$\varepsilon = \pm \frac{\delta_e}{P_{cp}} \cdot 100\% = \pm \frac{0,888}{1147,28} \cdot 100\% = \pm 0,077\%$$

**Пример 2.** При определении коэффициента местного сопротивления  $\zeta$  проходного вентиля на трубе диаметром  $d$  пьезометрические напоры до  $H_{n1}$  и после  $H_{n2}$  проходного вентиля измеряли по пьезометрам, а время наполнения  $W$  объема по секундомеру  $t$ .

Вычислить предельные абсолютную  $\delta_\zeta$  и относительную  $\varepsilon_\zeta$  ошибки определения коэффициента  $\zeta$ , если при проведении опыта были получены показания приборов, абсолютные и относительные ошибки измерения по ним каждой величины, которые приведены в табл.3.

Таблица 3

Величина	Ед. изм.	Расчетная величина	Вычисленные ошибки	
			Абсолютная $\delta_i$	Относительная $\varepsilon_i, \%$
Диаметр трубы $d$	мм	50	$\pm 0,06$	$\pm 0,12$
Показания первого пьезометра $H_{n1}$	мм	1360	$\pm 0,8$	$\pm 0,059$
Показания второго пьезометра $H_{n2}$	мм	1280	$\pm 0,8$	$\pm 0,062$
Объем воды $W$	л	30	$\pm 0,001$	$\pm 0,0033$
Время наполнения объема $t$	с	18	$\pm 0,07$	$\pm 0,39$

*Решение.* Опытное значение коэффициента местного сопротивления может быть вычислено в соответствии с формулой Вейсбаха

$$\zeta = \frac{g\pi^2}{8} \cdot \frac{t^2 d^4}{W^2} (H_{n1} - H_{n2}).$$

Подстановка в формулу опытных данных дает следующее значение коэффициента местного сопротивления проходного вентиля:

$$\zeta_{on} = \frac{9,81 \cdot 3,14^2}{8} \cdot \frac{18^2 \cdot 0,05^4}{0,03} \cdot (1,36 - 1,28) = 2,15$$

Для вычисления предельной абсолютной ошибки экспериментально определенного коэффициента местного сопротивления  $\zeta$  найдем дифференциал исходной расчетной функции, в котором в качестве приращений аргументов примем известные абсолютные ошибки соответствующих величин  $\delta_i$ :

$$\delta_{\zeta \text{ ПРЕРД}} = \frac{g\pi^2}{8} \left[ \frac{d^4}{W^2} (H_{n1} - H_{n2}) 2t\delta_t + \frac{t^2}{W^2} (H_{n1} - H_{n2}) 4d^3\delta_d + \left| t^2 d^4 (H_{n1} - H_{n2}) \left( -\frac{2}{W^3} \right) \delta_w \right| + \frac{t^2 d^4}{W^2} \delta_{H1} + \left| \frac{t^2 d^4}{W^2} (-\delta_{H2}) \right| \right].$$

Подставим численные значения величин:

$$\delta_{\zeta \text{ ПРЕРД}} = \frac{9,81 \cdot 3,14^2}{8} \cdot \left[ \frac{0,05^4}{0,03^2} \cdot (1,36 - 1,28) \cdot 2 \cdot 18\delta_t + \frac{18^2}{0,03^2} \cdot (1,36 - 1,28) \cdot 4 \cdot 0,05^3 \delta_d + 18^2 \cdot 0,05^4 \cdot \right. \\ \left. \cdot (1,36 - 1,28) \cdot \frac{2}{0,03^3} \cdot \delta_w + \frac{18^2 \cdot 0,05^4}{0,03^2} \delta_{H1} + \frac{18^2 \cdot 0,05^4}{0,03^2} \delta_{H2} \right] = 12,09 \cdot (0,02 \cdot \delta_t + 14,4 \cdot \delta_d + 12,0 \cdot \delta_w + \\ + 2,25 \cdot \delta_{H1} + 2,25 \cdot \delta_{H2}).$$

Из этого уравнения получаем веса абсолютных ошибок измерения каждой величины и значения ошибки искомой величины:

$$\delta_{\zeta \text{ ПРЕРД}} = 12,09 \cdot [0,02 \cdot 0,07 + (14,4 \cdot 0,06 + 12,0 \cdot 0,001 + 2,25 \cdot 0,8 + 2,25 \cdot 0,8) \cdot 10^{-3}] = 0,0071$$

Истинное значение коэффициента местного сопротивления  $\zeta$  испытываемого прямооточного вентиля диаметром  $d=50$  мм находится в интервале от  $2,15 - 0,0071 = 2,1429$  до  $2,15 + 0,0071 = 2,1571$ , т.е.  $2,1429 \leq \zeta \leq 2,1571$ .

Для вычисления предельной относительной ошибки экспериментально определенного коэффициента  $\zeta$  прологарифмируем исходное расчетное уравнение:

$$\ln \zeta = \ln \left( \frac{g\pi^2}{8} \right) + 2 \ln t + 4 \ln d - 2 \ln W + \ln (H_{n1} - H_{n2})$$

Возьмем дифференциал от полученной логарифмической функции, заменяя, как и в предыдущем случае, приращения аргументов абсолютными ошибками:



$$\frac{\delta_{\zeta}}{\zeta} = 2 \frac{\delta_t}{t} + 1 \frac{\delta_d}{d} + 2 \frac{\delta_w}{W} + \frac{\delta_{H1} + \delta_{H2}}{H_{n1} - H_{n2}}$$

Отсюда предельная относительная ошибка

$$\varepsilon_{\zeta \text{ ПРЕР}} = 2\varepsilon_t + 4\varepsilon_d + 2\varepsilon_w + \frac{\delta_{H1} + \delta_{H2}}{H_{n1} - H_{n2}}$$

Представляем численные значения относительных ошибок измеряемых в опыте величин:

$$\varepsilon_{\zeta \text{ ПРЕР}} = 2 \cdot 0,0039 + 4 \cdot 0,0012 + 2 \cdot 0,000033 + \frac{0,8 + 0,8}{1,56 - 1,28} = 0,0327 = 3,27\% .$$

Если полученное значение ошибки является недопустимым, то следует повысить точность замера по приборам (может быть, часть из них заменить на более точные).

### 3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА.

Результаты эксперимента по определению переменной величины могут быть представлены в виде графика, таблиц или эмпирических формул, описывающих тем или иным способом выявленную зависимость искомой функции от одного или нескольких аргументов.

#### 3.1. Графическое изображение результатов эксперимента.

В целом ряде случаев результаты измерений и вычислений в процессе экспериментальных исследований переменных величин удобно или необходимо представить в виде графика. Как правило, это график зависимости экспериментально изучаемой функции от одного из аргументов или от комплекса их.

Размер графика обычно зависит от целей его построения и дальнейшего применения, но во всех случаях следует стремиться к тому, чтобы форма графика была квадратной или близкой к ней.

Масштабы графика по его осям зависят от диапазона изменения величин аргумента и функции в пределах графика. В начале координат графика следует принимать не обязательно нулевые значения а лишь несколько меньшие самых малых величин аргумента или функции; в конце координатных осей должны быть указаны величины лишь несколько большие самых больших значений аргумента или функции. Такой способ выбора масштабов графика позволяет заполнить результатами эксперимента все поле графика.

На график наносятся все полученные в результате эксперимента точки, за исключением тех, что содержат грубые ошибки (они должны быть вычеркнуты еще в отчетном журнале и в обработке не участвовать). Если экспериментально изучаемая функция зависит не только от параметра оси абсцисс, но и от других параметров, то все экспериментальные точки можно располагать на одном графике, но при этом обязательно маркировать их (точками, кружочками, крестиками и т.п.) по каждому параметру в отдельности.

Наличие случайных ошибок в эксперименте («шума эксперимента») неизбежно приводит к так называемому разбросу точек: линия, соединяющая все опытные точки, окажется ломаной и неправильной формы, ничего общего не имеющей с плавным изменением изучаемой функции при плавном изменении аргумента. Поэтому результирующий график эксперимента сначала выполняют на глаз («от руки») в виде плавной линии так, чтобы опытные точки располагались не только по обе стороны от нее, но и возможно ближе к ней. Окончательно график эксперимента выправляют с помощью набора лекал или изгибаемой линейки.

#### 3.2 Подбор эмпирических формул

Установление функциональной зависимости, описывающей в аналитическом виде результаты проведенного эксперимента, начинают с анализа физической сущности изучаемого явления и вида графика, построенного по результатам эксперимента. Целью такого

анализа является выбор аппроксимирующей функции путем сравнения ее графика с экспериментальной кривой и достижения наибольшего сходства двух кривых.

Сначала выбирают функциональную зависимость из числа наиболее простых:

- прямая  $y = a + bx$  ; (32)

-парабола  $y = a + bx + c^2$  или  $y = \pm \sqrt{a + vx}$  ; (33)

-парабола  $n = a + bx^n$  , где  $n > 1$  ; (34)

-равносторонняя гипербола  $y = \frac{a}{x}$  или  $y = \frac{a_1 + b_1 x}{a_2 + b_2 x}$  ; (35)

-кривая гиперболического типа  $y = \frac{b}{x^n}$  ; (36)

-показательная кривая  $y = a_1 b^x$  или  $y = a + be^{cx}$  ; (37)

-логарифмика  $y = a + \ln x$  или  $y = a + b \lg x$  ; (38)

-синусоида  $y = a + b \sin cx$  ; (39)

-косинусоида  $y = a + b \cos cx$  ; (40)

-тангенсоида  $y = a + b \operatorname{tg} cx$  ; (41)

или другие «классические» типы кривых, графики которых при разных значениях коэффициентов  $a, b, c$  и  $n$  известны.

Если ни одна из «классических» кривых не подходит для установления функциональной зависимости, то следует использовать многочлен типа

$$y = a + bx + cx^2 + \dots + mx^n \quad (42)$$

Во всех вышеприведенных формулах каждый параметр ( $a, b, \dots, n$ ) может принимать любое значение, включая ноль и единицу.

График, построенный по результатам эксперимента, визуально сравнивают с графиком классической кривой. При этом следует иметь в виду, что экспериментальному графику может соответствовать не вся классическая кривая, а лишь ее конкретная часть, т.е. выбранная функция может описывать результаты эксперимента только в строго определенном интервале изменения своего аргумента. Если опытный график имеет криволинейную форму, то выбираемая для его описания функция  $y = f(x)$  должна быть нелинейной. В этих случаях сравнение двух графиков (опытного и выбранной нелинейной функции), проведенное грубо и на глаз может оказаться обманчивым. Тогда соответствие двух графиков проверяют методом линеаризации, сущность которого состоит в том что выбранную для будущей эмпирической формулы нелинейную функцию  $y = f(x)$  типов (32) – (42) превращают в уравнение прямой типа

$$Y = A + BX \quad (43)$$

путем, например логарифмирования или замены переменных, или каким-либо другим искусственным приемом, выбираемым отдельно для каждого конкретного вида функции  $y = f(x)$ . Например функцию  $y = ax^b$  заменяют функцией  $Y = \lg a + bX$ , где  $Y = \lg y$ ,

а  $X = \lg x$  или, например, функцию  $y = \frac{x}{a + bx}$  заменяют функцией  $Y = b + aX$ , где  $Y = \frac{1}{y}$

и  $X = \frac{1}{x}$  и т.п. Используя опытные данные  $x$  и  $y$  вычисляют значения новых переменных

$X$  и  $Y$  и наносят их на график в координатах  $X$  и  $Y$ . Если выбранная функция  $y = f(x)$  подходит для получения эмпирической формулы, то на графике  $X$  и  $Y$  пересчитанные опытные точки окажутся на одной прямой или достаточно близко от нее. В противном случае для описания результатов опыта следует искать функцию другого типа.

После выполнения линеаризации приступают к следующей операции – «определение параметров», смысл которой заключается в определении таких численных значений параметров  $a, b, \dots, n$  в функции, выбранной для получения эмпирической формулы, при которых аналитическая кривая способна с заданной точностью описать результаты опыта.

Определение параметров можно проводить или по методу «средних» (как наиболее простому), или по методу «наименьших квадратов» (как наиболее точному), хотя возможны и другие менее распространенные способы: метод равномерного приближения функции  $f(x)$  к эмпирической кривой в интервале  $a \leq x \leq b$  с использованием методов хорд или касательных и метод приближения в отдельных точках, когда требуется, чтобы эмпирическая формула описывала кривую, проходящую через определенные заранее выбранные точки, число которых, как правило, равно числу параметров  $a, b, \dots, n$ , входящих в исходную функцию.

По методу «средних» исходная нелинейная функция  $y = f(x)$  преобразуется, как и в операции «линеаризация», в линейное уравнение типа (23), где новые параметры А и В могут содержать не только один ( $a$ ) или два ( $a$  и  $b$ ), но и более ( $a, b, c, \dots, n$ ) параметров. Если исходная функция  $y = f(x)$  содержит не более двух параметров, то количество  $N$  всех опытных точек в координатах  $X$  и  $Y$  делится на две равные или почти равные части  $n_1$  и  $n_2$  (например,  $n_1$ - количество первой серии опытов, а  $n_2$ - второй, и  $n_1 + n_2 = N$ ). Для каждой опытной точки в координатах  $X$  и  $Y$  может быть записано линейное уравнение типа (43), сумма которых по  $n_1$  и  $n_2$  точкам приведет к системе из двух линейных уравнений:

$$\text{для точек, входящих в } n_1: (\sum Y)_{n_1} = n_1 A + B(\sum X)_{n_1}; \quad (44)$$

$$\text{для точек, входящих в } n_2: (\sum Y)_{n_2} = n_2 A + B(\sum X)_{n_2}; \quad (45)$$

В системе уравнений (44) и (45) неизвестными являются параметры А и В, которые и определяются путем ее решения.

Если исходная функция  $y = f(x)$  содержит более двух параметров (не только  $a$  и  $b$ , но и  $c, \dots, m$ ), то следует, обязательно используя другие формулы и приемы линеаризации, получить линейное уравнение типа

$$Y_1 = C + DX_1 \quad (46)$$

Повторив расчеты в координатах  $X_1$  и  $Y_1$ , находят значения параметров  $C$  и  $D$ , и так до тех пор, пока количество новых параметров  $A, B, C, \dots, M$  не окажется равным количеству параметров  $a, b, c, \dots, m$ , входящих в исходную функцию  $y = f(x)$  (32)-(42). Сами же параметры  $a, b, c, \dots, m$  определяют из формул, использованных при линеаризации функции  $y = f(x)$ .

По методу «средних» параметры эмпирической формулы определяются с учетом всех опытных точек, полученных в эксперименте, и имеют как бы среднее значение (отсюда и название метода).

Более точным, чем метод «средних», является метод «наименьших квадратов»; он более удобен в тех случаях, когда количество определяемых параметров эмпирической формулы более двух.

Если для эмпирической формулы выбрана функция

$$y = f(x, a, b, \dots, m), \quad (47)$$

то каждая экспериментальная точка  $K$  позволяет записать условие

$$y_k \approx f(x_k, a, b, \dots, m) \quad (48)$$

где  $a, b, c, \dots, m$ - пока неизвестные параметры эмпирической формулы. Знак примерного равенства ( $\approx$ ) указывает, что каждая опытная точка не обязательно будет лежать (тем более «точно») на кривой, описанной будущей эмпирической формулой, поэтому левая часть уравнения

$$y_k - f(x, a, b, \dots, m) = \delta \quad (49)$$

представляет собой отклонение измеренных значений  $y_k$  от расчетных  $y$  по определяемой эмпирической формуле (оно может быть и положительным и отрицательным).

Затем для всех  $N$  опытов находят сумму квадратов всех отклонений:

$$\sum (\delta)^2 = \sum_{k=1}^N [y_k - f(x_k, a, b, c, \dots, m)]^2 = \Delta, \quad (50)$$

в котором неизвестными будут только параметры  $a, b, c, \dots, m$ .

Сущность метода «наименьших квадратов» состоит в том, что искомым решением будут такие значения параметров  $a, b, c, \dots, m$ , при которых сумма  $\Delta$  будет наименьшей (отсюда и название метода), а следовательно, производные от суммы  $\Delta$  по любому из параметров равны нулю, т.е.

$$\frac{\partial \Delta}{\partial a} = 0, \frac{\partial \Delta}{\partial b} = 0, \frac{\partial \Delta}{\partial c} = 0, \dots, \frac{\partial \Delta}{\partial m} = 0 \quad (51)$$

По методу «наименьших квадратов» уравнение (50) превращается в систему алгебраических уравнений (51), число которых равно числу искомых параметров эмпирической формулы. Решение (51) и позволит определить численные значения искомых параметров  $a, b, c, \dots, m$ .

Естественно, что если в функцию (47), выбранную для получения эмпирической формулы, параметры  $a, b, c, \dots, m$  входят линейно, то и система уравнений (51) также будет линейной, что облегчит ее решение по сравнению с системой, содержащей и нелинейные уравнения. В противном случае или выбираемую функцию (47) следует сначала преобразовать к такому виду, чтобы все параметры входили в нее линейно, или решать систему уравнений, содержащую нелинейные уравнения (одно, несколько или все).

*Пример.* Экспериментально исследовалась схема выпуска очищенной воды в водоем, для чего на фиксированных расстояниях  $L$  от торца трубы замерялась скорость  $V$  на оси струи. Результаты замеров и вычислений приведены в таблице 4.

Таблица 4

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$L, м$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
$V, м/с$	1,06	0,69	0,51	0,46	0,35	0,34	0,29	0,26	0,22	0,21	0,20

Требуется подобрать эмпирическую формулу  $V = f(L)$ .

*Решение.* По результатам опыта (табл.4) строим опытный график функции  $V = f(L)$  (рис.1). Вид графика и физический смысл эксперимента показывают, что искомая функция нелинейная и график ее асимптотически приближается к оси абсцисс ( $V|_{L \rightarrow \infty} \rightarrow 0$ ). Поэтому в качестве базовой функции из (32)-(42) может быть взята равно-сторонняя гипербола (35) при  $b_1=0$ ;  $a_1=1$ , т.е. эмпирическую формулу будем искать в виде

$$V = \frac{a}{1 + bx} \quad (52)$$

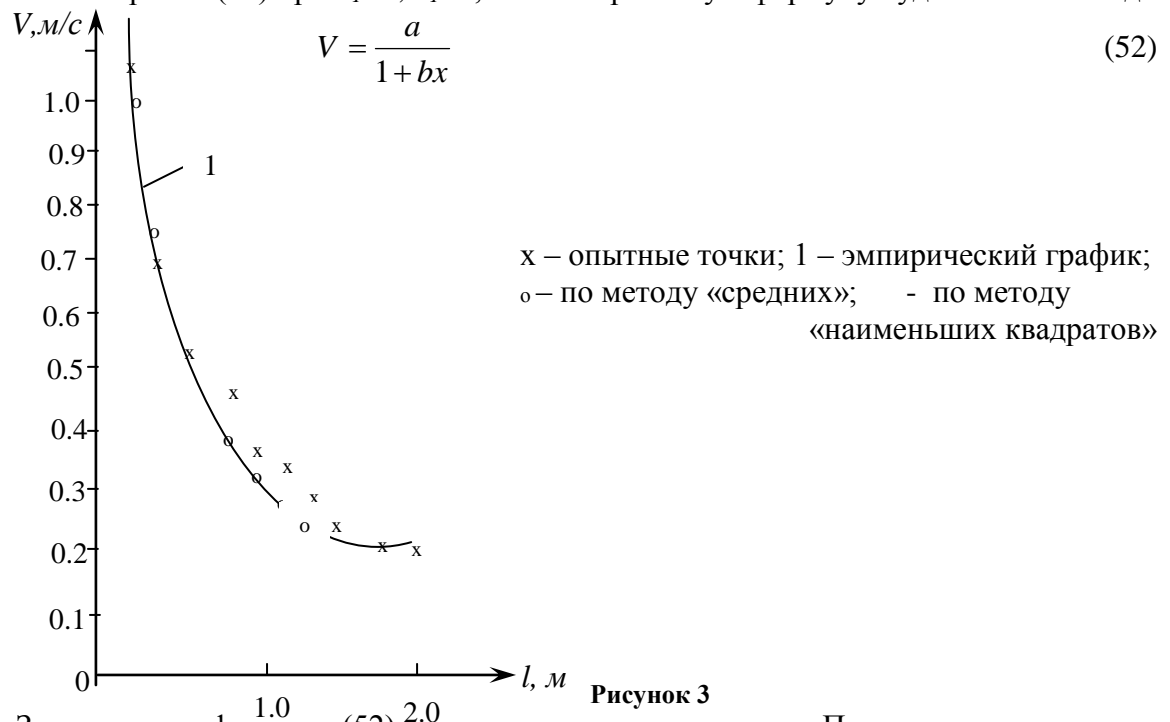


Рисунок 3

Заметим, что формула (52) имеет только два параметра. Проведем линеаризацию функции (52). Для этого воспользуемся приемом «замена переменных». Его проведем по формуле:

$$X = l, Y = \frac{1}{V}. \quad (53)$$

Тогда уравнение (52) примет вид (43), где

$$A = \frac{1}{a}, B = \frac{b}{a} \quad (54)$$

$$(\text{Проверка: } \frac{1}{V} = \frac{1}{a} + \frac{b}{a}l, \text{ откуда } V = \frac{a}{1+bl})$$

Подсчитываем новые данные (табл.5)

Таблица 5.

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
Y	0,9434	1,4493	1,9608	2,1739	2,8571	2,9412	3,4483	3,8461	4,5454	4,7619	5,0000

По данным пересчета (табл.4) построим график в координатах X и Y (рис. 4).

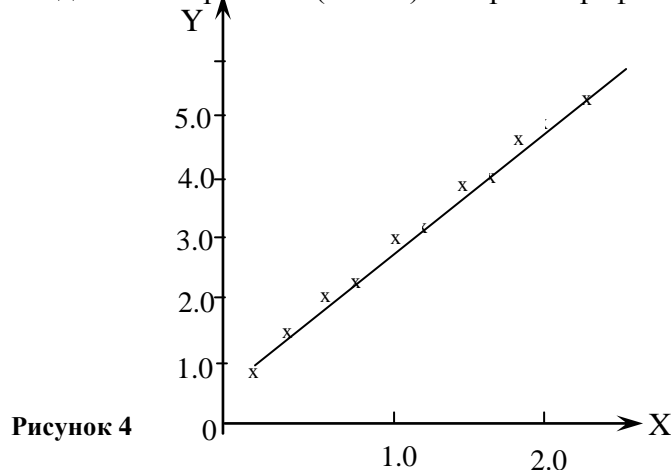


Рисунок 4

Точки измерений с достаточной точностью ложатся на прямую линию, т.е. гиперболическая кривая типа (35) может быть принята за основу для получения эмпирической формулы в данной задаче. Определим значения коэффициентов  $a$  и  $b$  с помощью метода «средних» и метода «наименьших квадратов», причем в обоих случаях будем пользоваться не формулой (52), в которой коэффициенты  $A$ ,  $B$  связаны с искомыми  $a$  и  $b$  по (54).

Для вычисления по методу «средних» общее число опытов (11) поделим на две части так:

$n=6$  – начальные номера опытов ( $1 \leq k \leq 6$ );

$N-n=5$  – конечные номера опытов ( $7 \leq k \leq 11$ ).

Записав уравнение (23) для каждой и  $k$  опытных точек, а затем сложив их по двум частям, получим систему из двух уравнений:

$$\sum_{k=1}^6 Y_k = nA + B \sum_{k=1}^6 X_k; \quad (55)$$

$$\sum_{k=7}^{11} Y_k = (N-n)A + B \sum_{k=7}^{11} X_k. \quad (56)$$

Используя данные табл.5, определяем:

$$\sum_{k=1}^6 X_k = 0,2 + 0,4 + 0,6 + 0,8 + 1,0 + 1,2 = 4,2;$$

$$\sum_{k=1}^6 Y_k = 0,9434 + 1,4493 + 1,9608 + 2,1739 + 2,8571 + 2,9412 = 12,3257;$$

$$\sum_{k=7}^{11} X = 1,4 + 1,6 + 1,8 + 2,0 + 2,2 = 9,0;$$

$$\sum_{k=7}^{11} Y = 3,4483 + 3,8461 + 4,5454 + 4,7619 + 5,00 = 21,6017.$$

Расчетная система уравнений будет:

$$\begin{cases} 6A + 4,2B = 12,3257 \\ 5A + 9,0B = 21,6017, \end{cases}$$

решение которой такое:

$$A = \frac{\begin{vmatrix} 12,3257 & 4,2 \\ 21,6017 & 9,0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 6 & 4,2 \\ 5 & 9,0 \end{vmatrix}} = \frac{12,3257 \times 9,0 - 21,6017 \times 4,2}{6 \times 9,0 - 5 \times 4,2} = 0,6121;$$

$$B = \frac{\begin{vmatrix} 6 & 12,3257 \\ 5 & 21,6017 \end{vmatrix}}{33} = \frac{6 \times 21,6017 - 5 \times 12,3257}{33} = 2,06$$

Параметры экспериментальной формулы:

$$a = \frac{1}{A} = \frac{1}{0,6121} = 1,6337; \quad \sigma = aB = 1,6337 \times 2,06 = 3,3654.$$

Искомая эмпирическая формула

$$V = \frac{1,6337}{1 + 3,3654l}. \quad (57)$$

Вычислим значения параметров эмпирической формулы по методу «наименьших квадратов». В качестве исходного уравнения воспользуемся, как и в методе «средних», уравнением (43), в котором коэффициенты  $A$  и  $B$  связаны с искомыми параметрами  $a$  и  $\sigma$  по (54). В этом случае уравнение (50) примет вид

$$\Delta = \sum_{k=1}^N [Y_k - (A + BX_k)]^2 \quad (58)$$

Производные от  $\Delta$  величин в (58) по искомым параметрам будут следующими:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta}{\partial A} &= 2 \sum_{k=1}^N [Y_k - (A + BX_k)](-1); \\ \frac{\partial \Delta}{\partial B} &= 2 \sum_{k=1}^N [Y_k - (A + BX_k)](-X_k). \end{aligned} \quad (59)$$

Приравняв их к нулю, получим систему двух линейных уравнений с двумя неизвестными  $A$  и  $B$ :

$$\begin{cases} NA + (\sum_{k=1}^N X_k)B = \sum_{k=1}^N Y_k; \\ (\sum_{k=1}^N X_k)A + (\sum_{k=1}^N X_k^2)B = \sum_{k=1}^N (X_k Y_k), \end{cases} \quad (60)$$

где  $N=11$ ;

$$\sum_{k=1}^N X_k = \sum_{k=1}^6 X_k + \sum_{k=7}^{11} X_k = 4,2 + 9,0 = 13,2;$$

$$\sum_{k=1}^N Y_k = \sum_{k=1}^6 Y_k + \sum_{k=7}^{11} Y_k = 12,3257 + 21,6017 = 33,9274;$$

$$\sum_{k=1}^N X_k^2 = 0,2^2 + 0,4^2 + 0,6^2 + 0,8^2 + 1,0^2 + 1,2^2 + 1,4^2 + 1,6^2 + 1,8^2 + 2,0^2 + 2,2^2 = 20,24;$$

$$\sum_{k=1}^N (X_k Y_k) = 0,2 \times 0,9434 + 0,4 \times 1,4493 + 0,6 \times 1,9608 + 0,8 \times 2,1739 + 1,0 \times 2,8571 +$$

$$+ 1,2 \times 2,9412 + 1,4 \times 3,4483 + 1,6 \times 3,8461 + 1,8 \times 4,5454 + 2,0 \times 4,7619 + 2,2 \times 5,00 = 49,7574.$$

Расчетная система уравнений будет такой:

$$\begin{cases} 11A + 13,2B = 33,9274 \\ 13,2A + 20,24B = 49,7574 \end{cases} \quad (61)$$

Решение ее дает результат:

$$A = \frac{\begin{vmatrix} 33,9274 & 13,2 \\ 49,7574 & 20,24 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 11 & 13,2 \\ 13,2 & 20,24 \end{vmatrix}} = \frac{33,9274 - 49,7574 \times 13,2}{11 \times 20,24 - 13,2 \times 13,2} = 0,618;$$

$$B = \frac{\begin{vmatrix} 11 & 33,9274 \\ 13,2 & 49,7574 \end{vmatrix}}{48,40} = \frac{11 \times 49,7574 - 13,2 \times 33,9274}{48,40} = 2,056$$

Параметры экспериментальной формулы вычисляем по (34):

$$a = \frac{1}{A} = \frac{1}{0,618}; v = aB = 1,618 \times 2,056 = 3,327$$

Тогда искомая эмпирическая формула будет иметь вид

$$V = \frac{1,618}{1 + 3,327l}. \quad (62)$$

Заметим, что в исходной формуле (52) не соблюдена размерность, поэтому формулами (57) и (62) можно пользоваться только подставляя расстояние  $l$  в метрах, а скорость получится в метрах в секунду.

Сопоставление результатов эксперимента (формула(57), рис.3) с результатами эмпирического графика (формула(62), рис.4) показано в табл.6.

Таблица 6

№ опыта	$l, \text{м}$	Скорость струи, $V \text{ м/с}$				Разница скоростей $\Delta V = V_{\text{расч}} - V_{\text{оп}}$			Относительная разность $\delta_v = \frac{\Delta V}{V_{\text{оп}}} \times 100 \%$		
		из опы-та	по опыт.гра-фику	по фор-муле (6)	по фор-муле (11)	по опытн. графику	по мето-ду «сред-них»	по мето-ду «наимен . квадр.»	по опытн. графику	по мето-ду «сред-них»	по мето-ду «наимен . квадр.»
1	0,2	1,06	1,06	0,976	0,972	0	-0,084	-0,092	0	-8,68	-8,68
2	0,4	0,69	0,69	0,696	0,694	0	+0,006	+0,004	0	+0,53	+0,58
3	0,6	0,51	0,53	0,541	0,540	+0,02	+0,031	+0,300	+3,92	+6,08	+5,88
4	0,8	0,46	0,44	0,442	0,442	-0,02	-0,018	-0,018	-4,35	-3,91	-3,91
5	1,0	0,35	0,38	0,374	0,374	+0,03	+0,024	+0,024	+8,57	+6,86	+6,86
6	1,2	0,34	0,33	0,324	0,324	-0,01	-0,016	-0,016	-2,94	-4,71	-4,71
7	1,4	0,29	0,28	0,236	0,286	-0,01	-0,004	-0,004	-3,45	-1,38	-1,38
8	1,6	0,26	0,24	0,256	0,256	-0,02	-0,004	-0,004	-7,69	-1,54	-1,54
9	1,8	0,22	0,22	0,231	0,232	0	+0,011	+0,012	0	+5,0	+5,45
10	2,0	0,21	0,21	0,211	0,211	0	+0,001	+0,001	0	+0,48	+0,48
11	2,2	0,20	0,19	0,194	0,194	-0,01	-0,006	-0,006	-5,0	-3,0	-3,00

## 4. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ИХ ПОТОКОВ.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

#### Измерение давления в жидкости и газе

##### 1. Цели и задачи работы.

1. Изучение различных конструктивных особенностей приборов для измерений давления в жидкости и газе.
2. Ознакомление с единицами измерения давления.
3. Измерение давления в жидкости и газе, находящихся в состоянии покоя, различными приборами.

##### 2. Основы теории.

###### 2.1. Давление в жидкости и газе и его виды

Давление в жидкости или газе представляет собой характеристику, определяемую как предел отношения сжимающей силы  $\Delta P$  к площади ее действия  $\Delta S$  при условии, что последняя стремится к нулю, т.е.

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta P}{\Delta S} \right| \quad (63)$$

Если жидкость или газ находится в состоянии покоя, то давление называется *гидростатическим*. Оно обладает двумя свойствами:

1. Гидростатическое давление внутри жидкости или газа действует нормально к площадке, воспринимающей его.
2. Гидростатическое давление в любой точке жидкости или газа не зависит от ориентировки площадки, на которую оно действует, т.е. гидростатическое давление действует одинаково по всем направлениям.

Под действием внешних сил давление в жидкости или газе может изменяться по направлению одной или нескольких координатных осей.

Давление  $p$  в жидкости или однородном ( $p = \text{const}$ ) газе, находящихся в равновесии под действием только силы тяжести определяется по так называемому основному уравнению гидростатики:

$$p = p_0 + \rho g(z - z_0) \quad (64)$$

где  $z$  - вертикальная координата (аппликата) рассматриваемой точки внутри жидкости или газа;  $z_0$  - аппликата точки с известным давлением  $p_0$ ;  $\rho$  - плотность жидкости или однородного газа;  $g$  - ускорение свободного падения.

Для объема покоящейся жидкости, имеющей свободную поверхность, уравнение (64) можно записать следующим образом:

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (65)$$

где  $p_0$  - давление паров жидкости (на свободной поверхности);

$h$  - глубина погружения рассматриваемой точки под уровень свободной поверхности жидкости (измеряется по вертикали).

В зависимости от того, что принято за точку отсчета давления, различают следующие его виды:

1. *абсолютное*  $p_{\text{абс}}$  - давление, отсчитываемое от абсолютного нуля;
2. *манометрическое*  $p_m$  и *вакуумметрическое*  $p_m$  - давление, отсчитываемое от атмосферного (рис. 5).



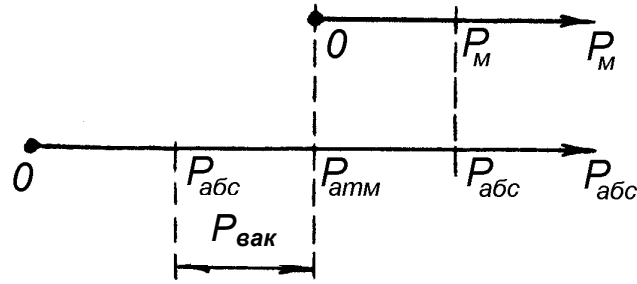


Рисунок 5

Величина манометрического давления ограничена с одной стороны, т.е.

$$\infty > p_m \geq 0.$$

Если абсолютное давление меньше атмосферного, то недостаток его до атмосферного называют *вакуумметрическим* давлением (иногда - *разряжением, вакуумом, отрицательным давлением*, для воздуха - *тягой*):

$$P_{\text{вак}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{абс}}. \quad (67)$$

Величина вакуумметрического давления ограничена с двух сторон:

$$P_{\text{вак}} \leq P_{\text{атм}}.$$

В открытых сосудах с жидкостью, где давление на свободную поверхность  $p_0 = P_{\text{атм}}$  формула (65) имеет вид

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} + \rho gh,$$

откуда

$$P_{\text{абс}} - P_{\text{атм}} = P_m = \rho gh = p_u, \quad (68)$$

т.е. в этом случае манометрическое давление внутри жидкости возникает только от веса столба жидкости, расположенного над рассматриваемой точкой. Такое давление называют *весовым* или *избыточным*  $p_u$  (иногда избыточным называют и манометрическое давление).

## 2.2. Единицы измерения давления.

Согласно формуле (63) давление выражается отношением силы к площади: т.е. единица измерения в различных системах будет:

$$[p] = \left[ \frac{\text{сила}}{\text{площадь}} \right]; \left( \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}; \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}; \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2} \right),$$

причем  $1 \text{ кгс}/\text{м}^2 = 9,81 \text{ Н}/\text{м}^2$  или  $1 \text{ Н}/\text{м}^2 = 0,0102 \text{ кгс}/\text{м}^2$ .

Кроме того, величина давления определяется и во внесистемных единицах измерения:

$1 \text{ Н}/\text{м}^2 = 1 \text{ Па}$  (Паскаль);

$10^5 \text{ Н}/\text{м}^2 = 1 \text{ бар}$  (бар);

$10^3 \text{ Н}/\text{м}^2 = 1 \text{ П}$  (Пьеза);

$1 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 10^4 \text{ кгс}/\text{м}^2 = 1 \text{ ат}$  (техническая атмосфера),

причем  $1 \text{ ат} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} = 0,981 \text{ бар}$ .

Из формулы (68) следует, что  $\frac{P}{\rho g} = h$ , т.е. каждой величине давления  $P$  соот-

ветствует определенная высота  $h$  столба жидкости плотностью  $\rho$ :  $[P]=[h \text{ ст. жидк.}]$ . В этом случае единицей измерения давления будет высота столба жидкости. Чаще всего для характеристики давления используется столб воды (*м. вод. ст.*; *мм вод. ст.*) или ртути (*мм рт. ст.*) и т.п..

Из формулы (68) следует, что давление в зависимости от рода жидкости может быть создано ее столбом различной высоты. Так, например, давление, равное  $1 \text{ ат}$ , создается столбом воды высотой 10 м, так как

$$h = \frac{p}{\rho g} = \frac{9,81 \cdot 10^4}{1000 \cdot 9,81} = 10 \text{ м вод. ст.}$$

или столбом ртути высотой 735,6 мм, так как

$$h = \frac{p}{\rho g} = \frac{9,81 \cdot 10^4}{13600 \cdot 9,81} = 0,7356 \text{ м рт. ст.} = 735,6 \text{ мм рт. ст.}$$

В окончательном виде связь между единицами измерения можно выразить следующим образом (табл.7).

Таблица 7

Величина измерен- ного дав- ления	Единица измерения						
	Н/м <sup>2</sup>	кгс/см <sup>2</sup>	Па	ат	бар	мм рт. ст.	м вод. ст.
	Пересчетные коэффициенты						
1 Н/м <sup>2</sup>	1	$1,02 \cdot 10^{-5}$	1	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$
1 кгс/см <sup>2</sup>	$98,1 \cdot 10^3$	1	$98,1 \cdot 10^3$	1	0,981	735,6	10
1 Па	1	$1,02 \cdot 10^{-5}$	1	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$
1 ат	$98,1 \cdot 10^3$	1	$98,1 \cdot 10^3$	1	0,981	735,6	10
1 бар	$10^5$	1,02	$10^5$	1,02	1	750	10,2
1 мм рт. ст.	133,3	$1,36 \cdot 10^{-3}$	133,3	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	1	$13,6 \cdot 10^{-3}$
1 м вод. ст.	$98,1 \cdot 10^3$	0,1	$98,1 \cdot 10^3$	0,1	$9,81 \cdot 10^{-3}$	73,56	1

### 2.3. Приборы для измерения давления.

Современная наука и техника предъявляют к используемым для измерения давления приборам самые разнообразные требования как по величине измеряемого давления (от миллионных долей Паскаля сотен тысяч атмосфер), так и по точности его измерения (величина относительной погрешности может достигать тысячных долей процента). Многообразие условий применения приборов и требований к ним по величине и точности измерения давления привело к созданию огромного количества приборов, различных по принципу действия, точности измерения и конструктивному оформлению.

Условно все типы приборов, предназначенных для измерения давления в жидкости и газе, можно классифицировать по следующим признакам:

1. По роду измеряемой величины:

- *барометры* - для измерения атмосферного давления;
- *манометры* - для измерения манометрического давления;
- *вакуумметры* - для измерения вакуумметрического давления ;
- *мановакуумметры* - для измерения манометрического и вакуумметрического давления;
- *дифманометры* - для измерения перепада (разности) давлений в двух точках .

Для измерения абсолютного давления необходимы два прибора: барометр и манометр, если  $p_{абс} > p_{атм}$  или барометр и вакуумметр, если  $p_{абс} < p_{атм}$ .

2. По принципу действия:

- *жидкостные* - рабочим органом является жидкость;
- *механические* - рабочим органом является упругий элемент;
- *грузопоршневые* - рабочим органом является поршень с грузом;
- *электрические* - рабочим органом является датчик.

3. По классу точности (для механических приборов):

- *рабочие(технические, лабораторные)* с классом точности  $K=0,35...6$ ;
- *образцовые* с классом точности  $K=0,005...0,30$ .

Класс точности  $K$  выражает наибольшую допустимую основную погрешность  $\Delta_{\max}$  (как правило, цена деления шкалы прибора) в процентах величины, соответствующей предельному значению шкалы прибора  $N$ :  $K = \frac{\Delta_{\max}}{N} \cdot 100\%$ .

### *Жидкостные приборы*

В жидкостных приборах для измерения давления используется величина столба жидкости или разница уровней жидкости в трубках (как правило, стеклянных) прибора.

Впервые идея применения жидкостных приборов для измерения давления была высказана в 1640 г. итальянским ученым Э. Торичелли и осуществлена итальянским механиком В. Вивiani (1642 г.) и французским ученым Б. Паскалем (1646 г.).

Они несложны в изготовлении и вместе с тем точны и надежны. Поэтому имеют широкое применение до настоящего времени.

Принцип действия жидкостных приборов прост. Отсчеты по жидкостному прибору необходимо делать по нижней поверхности вогнутого мениска (для воды) или по верхней поверхности выпуклого мениска (для ртути). Положение мениска визуально можно определить с точностью порядка 1 мм. Для повышения точности отсчета до 0,1-0,01 мм, а также для измерения малых давлений используются приборы, шкала которых снабжена нониусом и оптическим приспособлением (лупой).

Рассмотрим некоторые типы жидкостных приборов.

**Барометр** (рис.6) состоит из заполненных жидкостью плотностью  $\rho$  чашки 1 и трубки 2, верхний конец которой запаян, а нижний опущен под уровень жидкости. Атмосферное давление  $p_{\text{атм}}$ , действуя на поверхность жидкости в чашке, поднимает жидкость в трубке на высоту  $h$ . Величина атмосферного давления

$$p_{\text{атм}} = \rho gh, \quad (70)$$

где  $h$  отсчитывается от поверхности уровня жидкости в чашке.

Для уменьшения высоты прибора обычно применяют самую тяжелую жидкость - ртуть (ртутный барометр).

Фактически на поверхность жидкости в запаянной трубке тоже действует давление, равное давлению насыщенных паров  $p_{\text{нп}}$  при данной температуре. Например, для ртути при 20°C  $p_{\text{нп}}=2 \cdot 10^{-6}$  ат. Этой величиной или пренебрегают, или градуируют шкалу барометра не в линейных единицах, а с учетом поправки на  $p_{\text{нп}}$ .

**Пьезометр** (рис. 7) представляет собой стеклянную трубку 1 диаметром 10-15мм, нижний конец которой подсоединяется к резервуару 2 с жидкостью, а верхний - открыт. В пьезометре находится та же жидкость, что и в резервуаре (пьезометром нельзя измерять давление в газах). Показание пьезометра  $h_n$  отсчитывается по шкале от уровня точки подключения его к резервуару (т. А). Согласно основному закону гидростатики абсолютное давление

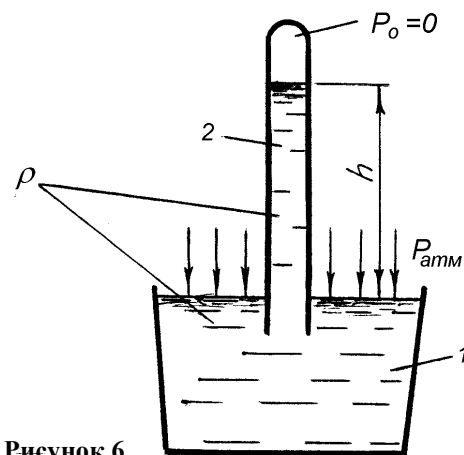


Рисунок 6

$$p_{абс} = p_{атм} + \rho g h_n \quad (71)$$

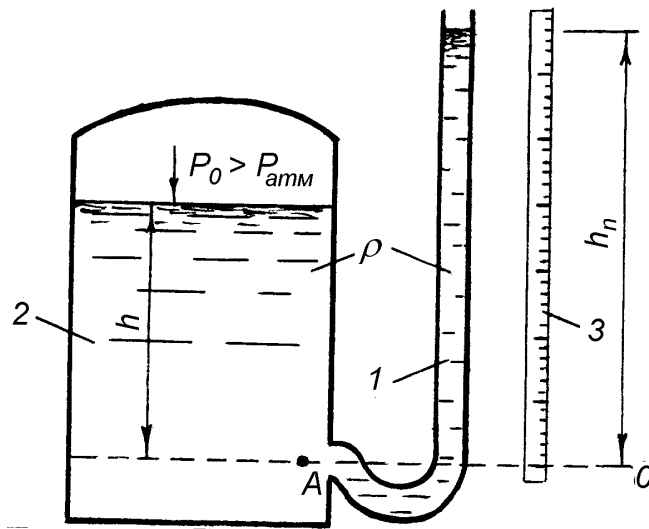


Рисунок 7

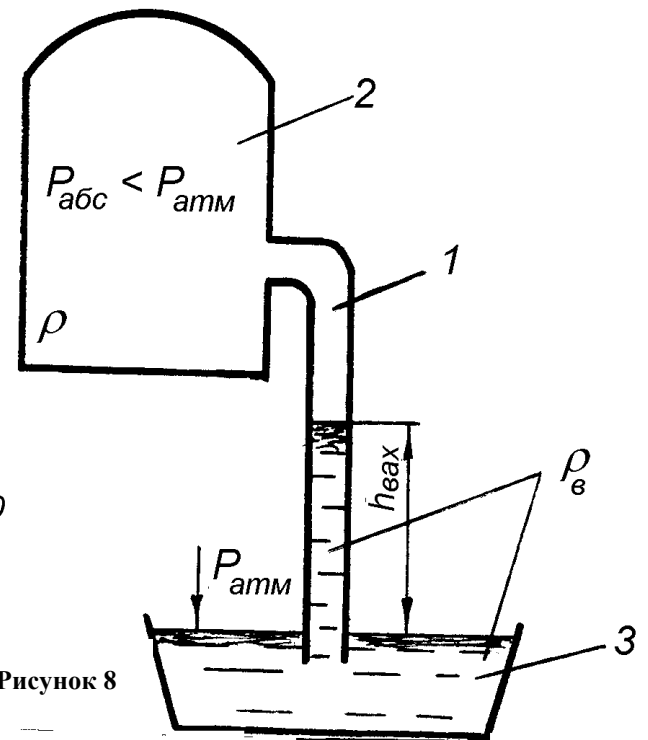


Рисунок 8

где  $h_n$  - высота столба жидкости в стеклянной трубке, называемая *пьезометрической* высотой.

Если в резервуаре абсолютное давление над поверхностью жидкости будет равно атмосферному, то уровень в пьезометрической трубке установится на той же высоте, что и в резервуаре, и пьезометрическая высота в точке  $A$  будет равна глубине погружения  $h$ , данной точки.

Пьезометры используются для измерения давления, при котором требуемая высота пьезометра  $h_n$  не более 1,5-2,0 м.

Вакуумметр (рис. 8) представляет собой стеклянную трубку 1, один конец которой соединен с областью вакуума 2, а другой опускается в сосуд с жидкостью 3 с атмосферным давлением на поверхности. Вследствие того, что давление в сосуде 2 меньше атмосферного, жидкость в трубке 1 поднимается на некоторую высоту называемую *вакуумметрической* высотой:

$$h_{\text{вак}} = \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{абс}}}{\rho_{\text{ж}} g} = \frac{p_{\text{вак}}}{\rho_{\text{ж}} g} \quad (72)$$

Такой вакуумметр иногда называют обратным пьезометром.

U-образный мановакуумметр (рис. 9) состоит из стеклянной трубки 1, согнутой наподобие буквы "U", нижняя часть которой заполнена жидкостью плотностью  $\rho_m$ . Один конец трубки соединяется с точкой измерения давления в объеме 2 жидкости или газа, а второй открыт в атмосферу. При  $p > p_{\text{атм}}$  уровень жидкости в левом колене понизится, а в первом повысится (прибор называют манометром); при  $p < p_{\text{атм}}$  уровень жидкости в левом колене поднимется, а в правом - понизится (прибор называют вакуумметром).

Абсолютное давление в точке присоединения мановакуумметра

$$P_{абс} = P_{атм} \pm \rho_m g 2h \pm \rho g(a + h) \quad (73)$$

(перед вторым слагаемым принимается знак "+" для манометра и "-" для вакуумметра; знак перед третьим слагаемым зависит от взаимного высотного расположения точки замера давления и ноля шкалы прибора: "+" - ноль прибора выше; "-" - ниже.

Чашечный мановакуумметр (рис.10) - представляет собой чашку 1 диаметром  $D$  с рабочей жидкостью плотностью  $\rho_m$ . С чашкой соединена стеклянная трубка 2 диаметром  $d$ . Ноль шкалы прибора 3 устанавливается на уровне поверхности рабочей жидкости в чашке до измерения давления.

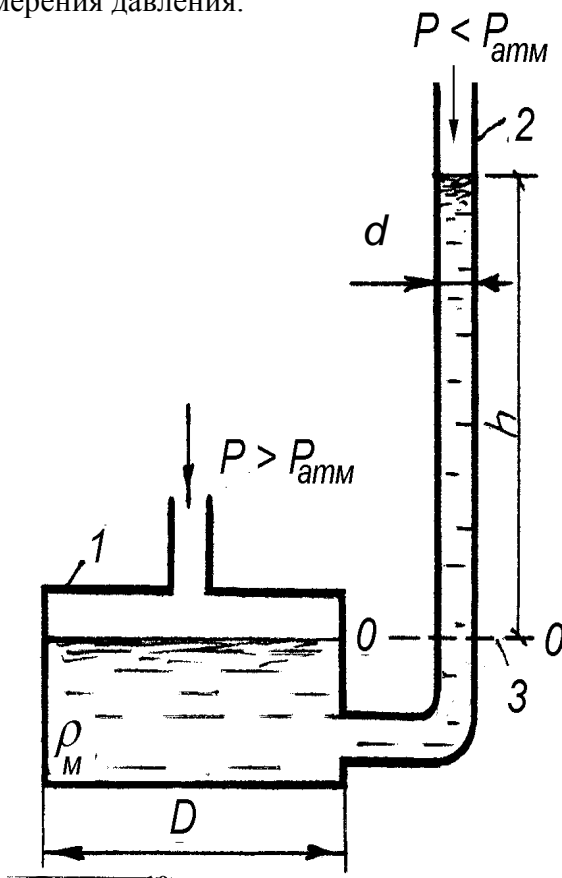


Рисунок 10

Батарейный (многоколенный) манометр (рис.11) представляет собой несколько (не менее двух) последовательно соединенных U-образных манометров.

Абсолютное значение давления в точке подсоединения прибора к объему жидкости или газа

$$P_{абс} = P_{атм} + g[\rho_{m3}(z_5 - z_4) + \rho_{m2}(z_4 - z_3) + \rho_{m1}(z_3 - z_2) + \rho(z_2 - z_1)] \quad (75)$$

Двухжидкостный мановакуумметр (рис. 12) состоит из чашки 1 диаметром  $d_3$ , заполненной жидкостью плотностью  $\rho_2$ , и трубки 2 переменных диаметров  $d_1$  и  $d_2$ , частично заполненной жидкостью плотностью  $\rho_1$  (причем  $\rho_1 < \rho_2$ ) и опущенной нижним концом под уровень жидкости в чашке. Верхний конец трубки 2 подводится к системе с измеряемым манометрическим или вакуумметрическим давлением. При этом положение мениска жидкости в трубке  $d_1$  изменится на величину  $h$  (показание прибора).

Величина измеряемого давления:

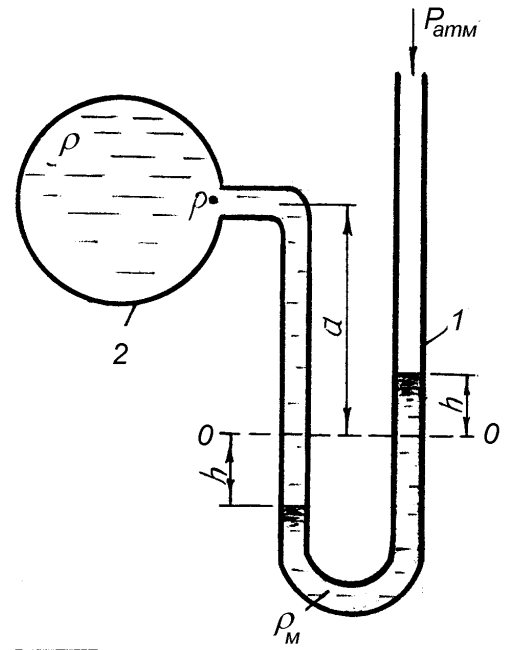


Рисунок 9

Применяется чашечный мановакуумметр для измерения давления в газах: при  $P_{абс} > P_{атм}$  к точке измерения давления подсоединяется чашка, а при  $P_{абс} < P_{атм}$  - трубка.

Манометрическое или вакуумметрическое давление на уровне ноля шкалы прибора

$$P_{вак}^м = \rho_m g h \left[ 1 + \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right]. \quad (74)$$

$$p_{\text{вак}}^{\text{м}} = gh \left[ \rho_1 \left( 1 - \frac{d_1^2}{d_2^2} \right) + \rho_2 \left( \frac{d_1^2}{d_2^2} + \frac{d_1^2}{d_3^2 - d_2^2} \right) \right]. \quad (76)$$

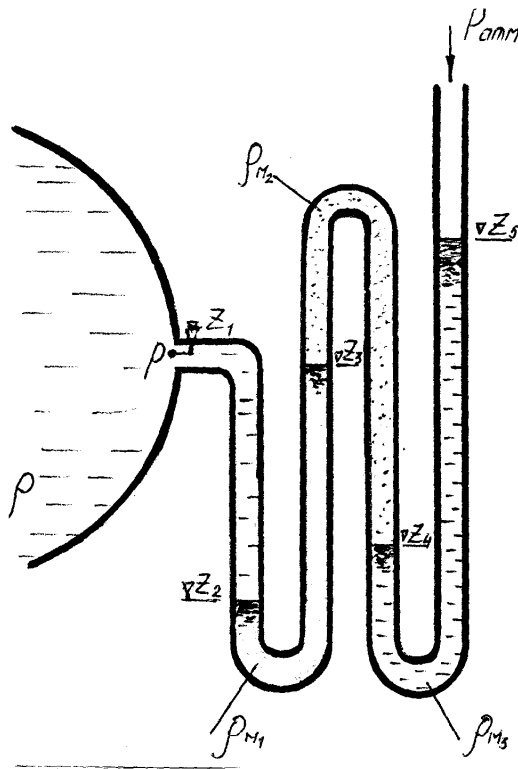


Рисунок 11

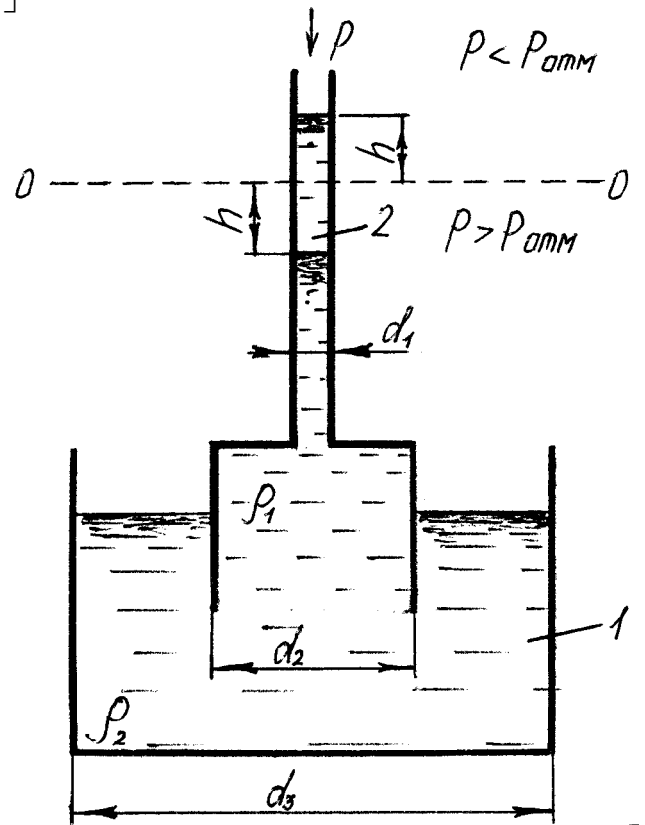


Рисунок 12

До начала измерения давления шкалу прибора устанавливают так, чтобы ее ноль совпадал с уровнем жидкости  $\rho_1$ , в трубке 2.

Чашечный микромановакуумметр (рис. 13) представляет собой чашечный мановакуумметр (см. рис. 6) с наклонно расположенной стеклянной трубкой.

По шкале наклонного микромановакуумметра вместо малой высоты  $h$  отсчитывается большая величина  $l = h / \sin \alpha$ , что позволяет уменьшить относительную ошибку, возможную при измерении малых давлений. Величина измеряемого давления

$$p_{\text{вак}}^{\text{м}} = \rho_m g l \sin \alpha \left[ 1 + \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right]. \quad (77)$$

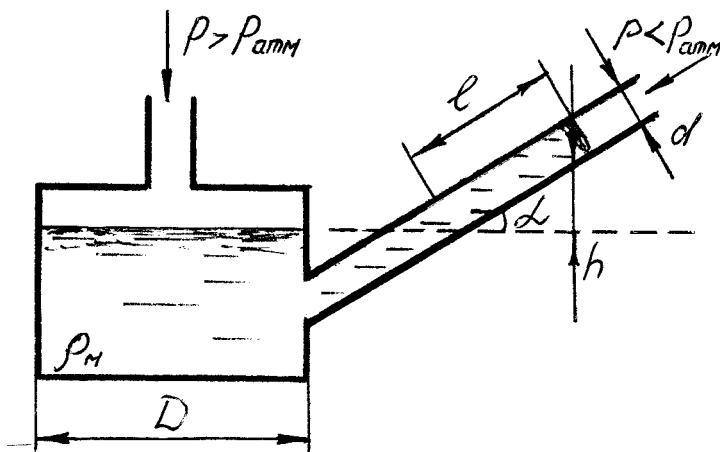


Рисунок 13

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \rho_m g 2h - \rho g (z_1 - z_2 + 2h).$$

(78)

Угол наклона манометрической трубки может изменяться. При этом уменьшение угла наклона способствует увеличению чувствительности прибора.

Дифференциальный манометр (дифманометр) представляет собой U-образный манометр (см. рис. 9), в котором оба конца стеклянной трубки подсоединены к точкам измерения давлений (рис. 14):

где  $z_1$  и  $z_2$  – превышение (в том числе возможно и отрицательное) точек измерения давления над «нулем» шкалы прибора.

Двухжидкостный микродифманометр (рис. 15) представляет собой спаренные разновидности чашечного мановакуумметра (см. рис. 6), обе чашки которых заполнены разными несмешивающимися жидкостями ( $\rho_{m1} > \rho_{m2}$ ) и подсоединены к точкам измерения давлений. Ноль прибора устанавливается на плоскости разделения жидкостей до подсоединения прибора.

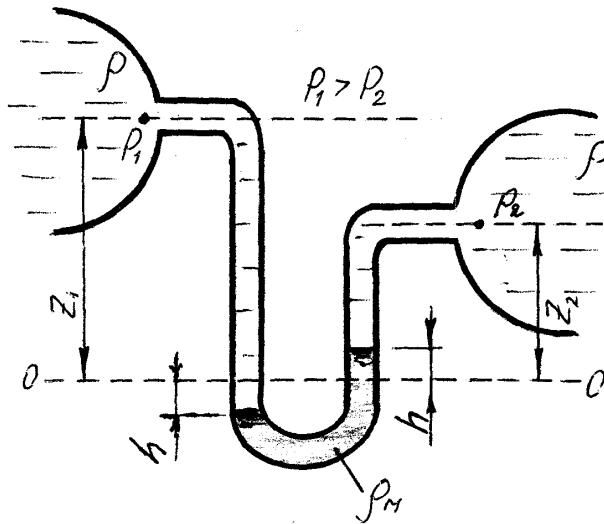


Рисунок 14

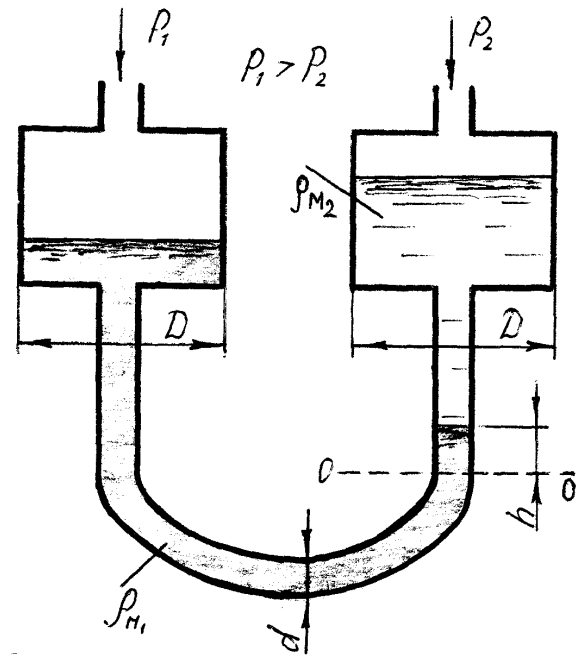


Рисунок 15

Применяется микродифманометр для измерения малых перепадов давлений в газе:

$$p_1 - p_2 = \Delta p = gh \left| (\rho_{m1} - \rho_{m2}) + \frac{d^2}{2} (\rho_{m1} + \rho_{m2}) \right| \quad (79)$$

Чем ближе значения плотностей жидкостей  $\rho_{m1}$  и  $\rho_{m2}$ , тем точнее измерение перепада давлений (при данном  $\Delta p$  больше величина  $h$ ).

Двухжидкостный микродифпъезометр (рис. 16) представляет собой спаренные в верхней части два пьезометра (см. рис. 7); верхняя часть прибора заполнена жидкостью плотностью  $\rho_m < \rho$ .

Применяется микродифпъезометр для измерения малых перепадов давлений в жидкостях

$$p_1 - p_2 = \Delta p = (\rho - \rho_m) \rho h. \quad (80)$$

Чем ближе значения плотностей жидкостей  $\rho$  и  $\rho_m$ , тем выше точность прибора.

Если верхняя часть прибора заполнена воздухом ( $\rho_m = 0$ ) то прибор, называемый дифпъезометром, применяют для измерения разницы пьезометрических напоров в жидкостях:

$$\Delta z + \frac{\Delta P}{\rho g} = h \quad (81)$$

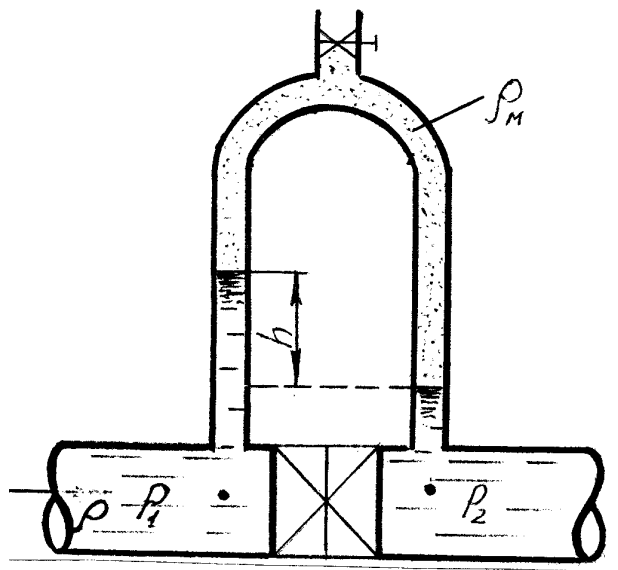


Рисунок 16

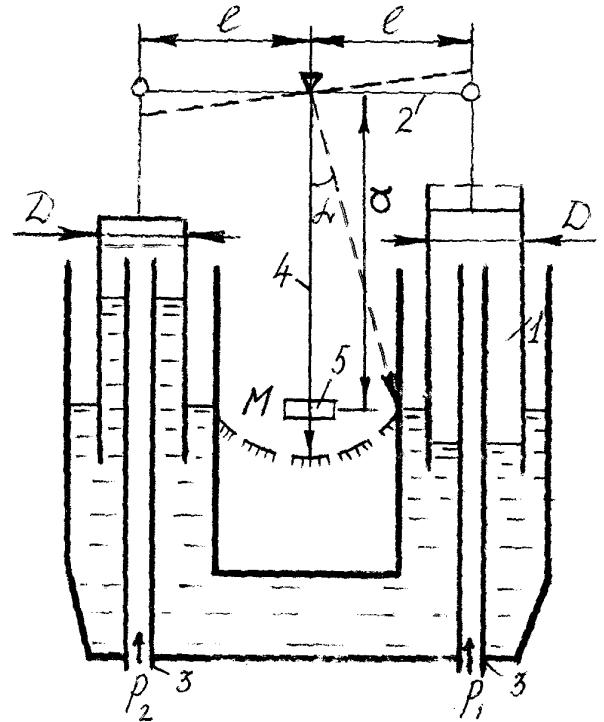


Рисунок 17

Колокольный дифманометр (рис. 17), применяемый для измерения разницы давлений в газе, состоит из двух тонкостенных колоколов 1 диаметром  $D$ , подвешенных на концах коромысла 2 с плечами, равными  $l$ ; колокола перевернуты и нижними концами опущены в жидкость. Система с измеряемыми давлениями  $p_1$  и  $p_2$  подсоединяется внутрь подколокольных объемов трубками 3, изменяя погружение их в жидкость. К коромыслу подсоединен стержень 4 длиной  $a$ , на котором закреплен груз 5 массой  $M$ . Под действием разницы давлений ( $p_1 \neq p_2$ ,  $p_1 > p_2$ ) колокола погружаются на разную глубину и стержень с грузом поворачивается на угол  $\alpha$ .

Измеряемый перепад давлений в газе

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \frac{4Mga \sin \alpha}{\pi D^2 l} \quad (82)$$

Кольцевой дифманометр (рис. 18) состоит из трубки диаметром  $d$ , согнутой в кольцо диаметром  $D$ , нижняя часть кольцевой трубки на высоту " $b$ " (причем  $0 < b < 0,5D$ ) заполнена жидкостью плотностью  $\rho_m$ ; к ним на расстоянии  $a$  прикреплен груз массой  $M$  и стрелка. Под действием разницы давлений ( $p_1 \neq p_2$ ) в газе уровни жидкости в коленях трубки будут разными и отличаться на величину ( $\Delta p / (\rho_m g)$ ), что вызовет поворот кольца прибора на угол  $\alpha$ . Применяется кольцевой дифманометр для измерения разницы давлений в газе.

Измеряемый перепад давлений в газе

$$\Delta p = \rho_m g D \sqrt{\frac{b(D-d)}{D}} \sin \left[ \frac{M_{cp} a \sin \alpha}{\rho_m \left( \frac{\pi d D}{2} \right)^2 \frac{\sqrt{b(D-d)}}{180 \cdot D}} \right] \quad (83)$$

Основные правила пользования жидкостными приборами для измерения давления следующие:



1. Прибор должен быть установлен вертикально.
2. До начала измерений ноль шкалы прибора должен совпадать с уровнем жидкости в нем.
3. Перед измерением давления в жидкости необходимо удалить из трубок прибора и трубок, соединяющих прибор с местом измерения давления, случайные пузырьки воздуха (произвести "проливку" трубок прибора), а перед измерением давления в газе - удалить случайные включения жидкости (произвести "продувку" трубок прибора).
4. Для уменьшения влияния капиллярности на показание прибора по уровню жидкости в трубках целесообразно применять для воды трубки диаметром 10-15 мм, а для ртути - 6-9 мм.
5. Проверку и градуировку приборов следует производить примерно при той же температуре, при которой будет выполняться эксперимент (в противном случае это следует учитывать как систематическую ошибку).

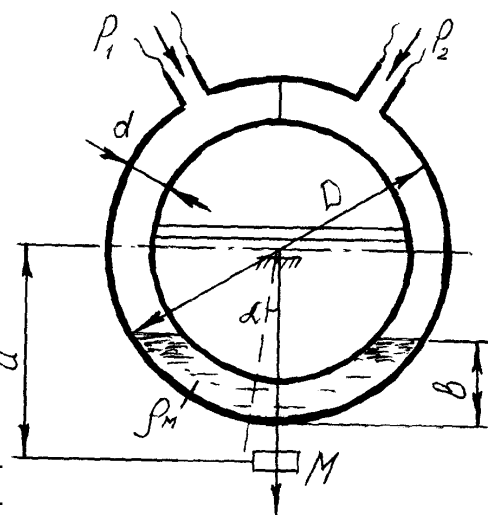


Рисунок 18

### Механические приборы

Механические приборы (манометры, вакуумметры и мановакуумметры) применяются для измерения давления и разряжения главным образом в технических целях и имеют практически неограниченный диапазон измерения, начиная от сотых долей до тысяч атмосфер.

Механические приборы могут применяться для измерения атмосферного давления (в этом случае их называют барометрами-анероидами).

Принцип действия механических приборов для измерения давления состоит в том, что под действием давления происходит деформация упругого элемента, пропорциональная величине измеряемого давления. Деформация упругого элемента через систему рычагов и шестерен поворачивают стрелку прибора, отмечающую на шкале прибора величину измеряемого давления или разряжения. Шкала градуирована по одной из единиц измерения давления (ат, Па, мм рт. ст., мм вод. ст., кгс/см<sup>2</sup>, ...).

Идея применения механического прибора для измерения давления была высказана впервые в 1846 г. немецким ученым Р.Щинцом.

По типу упругих элементов механические приборы, применяемые для измерения давления, подразделяются на пружинные, мембранные и сильфонные.

Пружинные приборы имеют основную деталь в виде согнутой по дуге окружности полой трубки с поперечным сечением в форме овала или эллипса (так называемая трубка Бурдона, предложенная в 1848 г.).

Пружинные манометры (рис. 19) работают по следующему принципу. Жидкость или газ поступают через штуцер 1 в пружину - трубку Бурдона 2. При давлении внутри трубки, превышающем атмосферное, трубка-пружина немного распрямляется. Распрямление пружины при помощи пластинки 3 передается на зубчатку 4, приводящую в движение стрелку 5. Ноль шкалы манометра соответствует атмосферному давлению, и поэтому от-

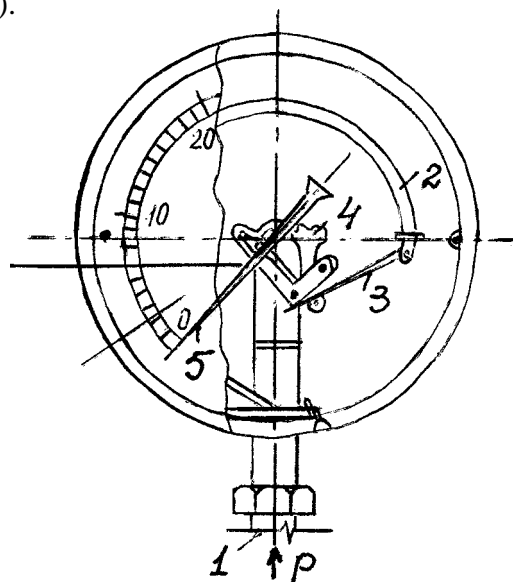


Рисунок 19

клонение стрелки 5 показывает по шкале только манометрическое (избыточное) давление. Пружинные манометры применяются для измерения давления от 1 ат до сотен атмосфер.

Пружинные вакуумметры и мановакуумметры по устройству аналогичны пружинным манометрам. У мановакуумметров одна часть шкалы показывает манометрическое давление, а другая - вакуумметрическое (разряжение).

**Мембранные приборы** (рис. 20) в качестве упругого элемента имеют мембрану 1 или мембранную коробку, по величине деформации которых судят о величине измеряемого давления. До известного предела прогиб мембран линейно зависит от давления, благодаря чему они нашли широкое применение в манометрах, барометрах и вакуумметрах. Обычно мембранные манометры используют для измерения давления от 0,2 до 30 ат или при измерении давления в химически активных средах, в последнем случае нижняя сторона мембраны покрывается защитным слоем.

Мембранные приборы предложены впервые в 1847 г. английским механиком В. Вайди.

В **сильфонных приборах** (рис. 21) в качестве упругого элемента используются сильфоны 1, представляющие собой гофрированную коробку, выполненную в виде цилиндра с равномерными складками (гофрами). Под действием разницы атмосферного и измеряемого давлений сильфон или

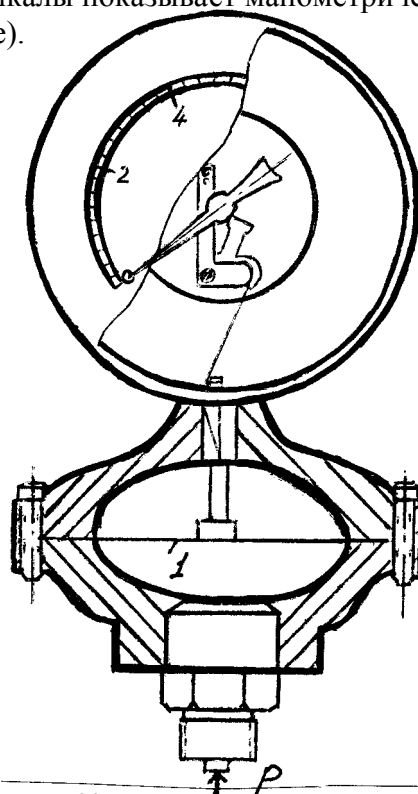


Рисунок 20

растягивается ( $p > p_{атм}$ ), или сжимается ( $p < p_{атм}$ ), изменяя свою длину  $l$  пропорционально величине измеряемого давления. Сильфонные манометры применяются для измерения давления от 0,5 до 5 ат.

Простота устройства и применения, портативность и большой диапазон измеряемого давления являются ценными достоинствами механических приборов, обусловившими их широкое применение.

Правила пользования механическими приборами для измерения давления таковы:

1. Рабочее положение механического прибора, как правило, является вертикальным с направленным вниз штуцером.
2. Соединительные трубки (от места измерения давления до прибора) должны быть целиком заполнены) или только жидкостью, или только воздухом, для чего периодически проводится или «проливка», или «продувка» их.
3. Перед началом и после окончания измерений должна проверяться установка стрелки прибора на "ноль", так как рабочие органы приборов с течением времени могут постепенно изменять свои упругие свойства или иметь остаточные деформации, а передаточный механизм подвержен естественному износу.
4. При измерении давления пружинными и сильфонными приборами в агрессивных средах должно быть предусмотрено устройство в соединительных трубках гидравлических затворов, защищающих прибор от порчи (например, ртутно-масляный затвор).
5. При измерении давления в горячих средах, способных нарушить спайки внутри при-

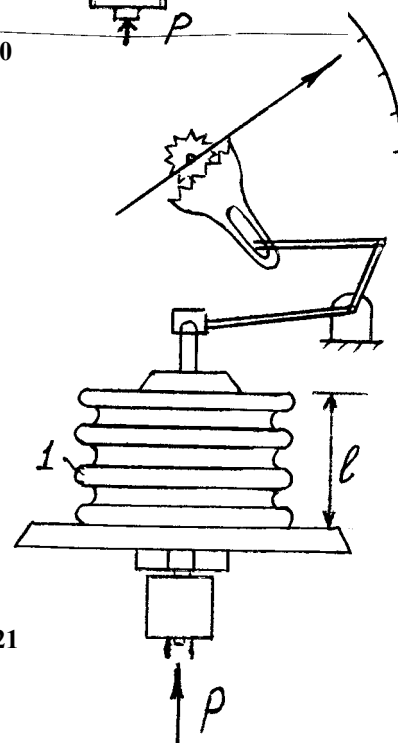


Рисунок 21

бора, необходимо предусмотреть снижение температуры среды в соединительных трубках.

### Грузопоршневые приборы

Принцип действия грузопоршневых приборов заключается в уравнивании силы (как правило, веса) силой, создаваемой измеряемым давлением (рис. 22). Прибор состоит из цилиндра 1, плунжера 2 диаметром  $d$  и грузовой тарелки 3. Измеряемое давление подается внутрь цилиндра под плунжер, а уравнивается оно грузом  $G$ , устанавливаемым на тарелке.

Величина измеряемого давления

$$p = \frac{4G}{\pi d^2} \quad (84)$$

Грузопоршневые приборы являются наиболее точными приборами для измерения больших давлений. Часто их применяют как образцовые для проверки точности других приборов.

Основные правила пользования грузопоршневыми приборами таковы:

1. Масла, используемые в этих приборах должны быть бескислотными и профильтрованными (как правило, при давлении до 250 ат - трансформаторное, свыше - касторовое).
2. Перед измерением давления воздух из внутренних полостей прибора должен быть удален, а плоскость грузоприемной тарелки установлена горизонтально.
3. Во избежание появления сухого трения плунжер при измерениях давления должен приводиться во вращательное движение вокруг своей продольной оси.

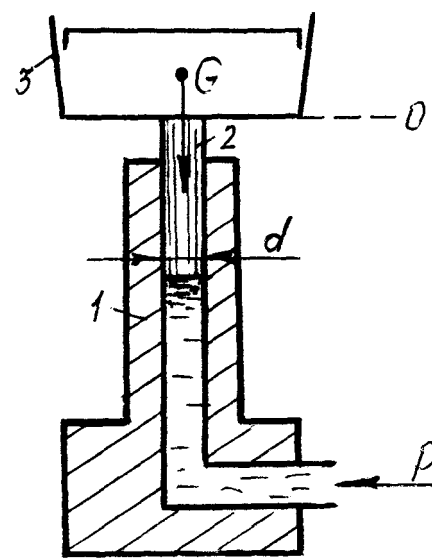


Рисунок 22

Отличительными характеристиками механических и грузопоршневых приборов являются порог чувствительности и вариация.

*Порогом чувствительности* называется наименьшее изменение значения измеряемого давления, способное вызвать изменение показания прибора, заметное при визуальном наблюдении. Он обусловлен трением в механизме прибора и несовпадением зацеплений в его кинематическом механизме от рабочего органа прибора до стрелки шкалы.

*Вариацией* называется наибольшая разность между повторными показаниями прибора при одном и том же значении измеряемого давления, но сначала при прямом ходе измерения (возрастающие величины давления), а затем - при обратном (убывание величины давления). Она вызывается упругим последствием и гистерезисом рабочего органа, а также и теми причинами, от которых зависит величина порога чувствительности.

### Электрические приборы

Электрические приборы воспринимают измеряемое давление датчиком (рис. 23), преобразующим величину давления в электрическую величину, которая может непрерывно изменяться вслед за изменением измеряемого давления; по электрической цепи сигнал передается на регистрирующий или электроизмерительный прибор.

Если собственный электрический выходной сигнал мал, то в электрическую цепь включают усилитель.

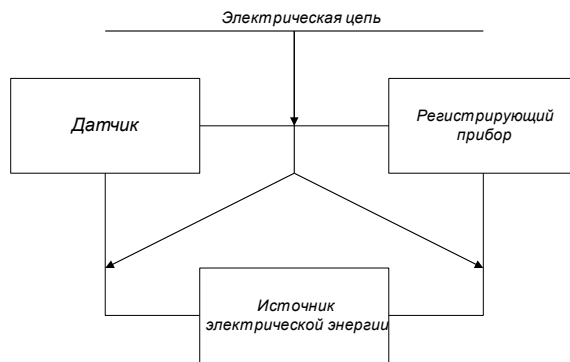


Рисунок 23

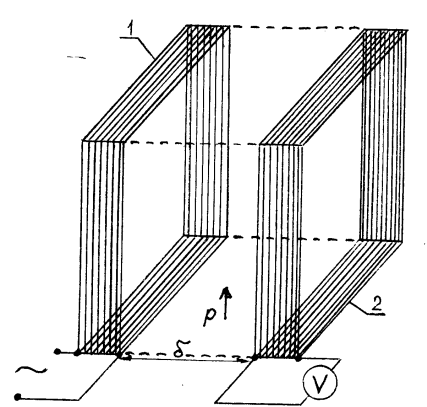


Рисунок 24

Вся измерительная цепь питается от источника электрической энергии. Воздействие давления жидкости или газа на датчик приводит либо к возникновению электродвижущей силы (такие датчики называются *генераторными*), либо к изменению некоторых электрических характеристик (такие датчики называются *параметрическими*).

К основным типам генераторных датчиков давления (иногда их называют *преобразователями*) относятся:

- *индукционные* (рис.24), в которых воздействие давления  $p$  вызывает изменение относительного положения обмоток первичной (1) и вторичной (2) цепей  $\delta$ , что приводит к изменению ЭДС взаимоиндукции во вторичной (измерительной) цепи;
- *пьезоэлектрические* (рис.25), в которых используется открытое еще в 1880 г. явление пьезометрического эффекта, заключающееся в способности некоторых кристаллических тел (кварца, турмалина, сигнетовой соли, титанита бария, сульфата лития и др.) образовывать на противоположных сторонах своих кристаллов  $K$  под действием механической деформации (например, сжатия) электрические заряды разных знаков.

К основным типам параметрических датчиков давления относятся:  
*индуктивные* (рис. 26), в которых используется способность индуктивной катушки И.К.(проволочной спирали с сердечником из ферромагнитных материалов или без него) изменять свою индуктивность при изменении ее отдельных параметров (магнитного сопротивления, числа витков, положения сердечника  $\delta$  и т.п.) под действием измеряемого давления  $p$  жидкости или газа:

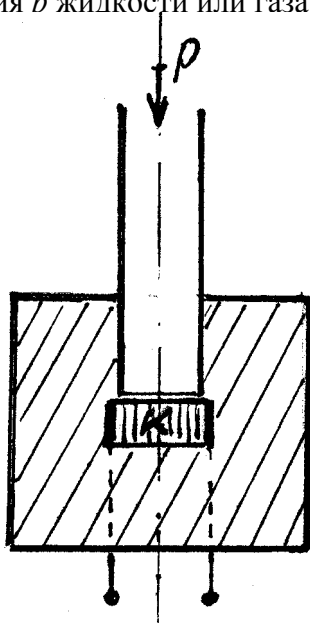


Рисунок 25

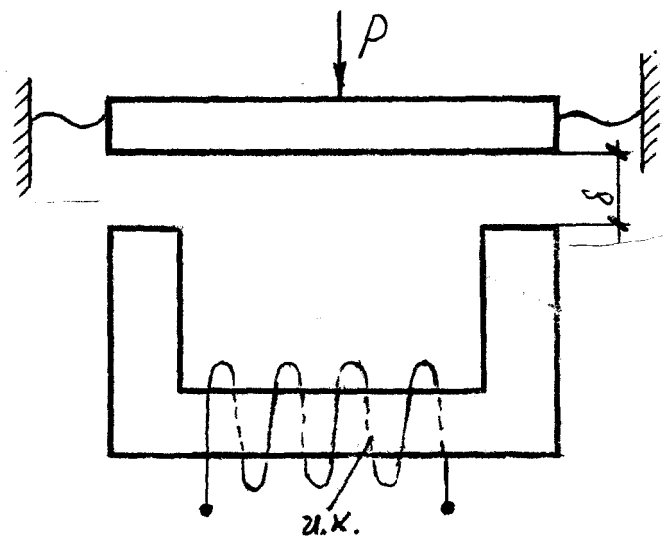


Рисунок 26

*емкостные* (рис. 27), в которых используется свойство конденсаторов изменять свою емкость при изменении расстояния между его обкладками (например, путем прогиба одной из пластин конденсатора, выполненной в виде мембраны) под действием измеряемого давления  $p$  жидкости или газа;

*сопротивления* (рис. 28), в которых используется явление изменения электрического сопротивления некоторых материалов (константан, манганин, нихром, германий и др.), выполненных в виде проволоки или фольги Д.С., в результате деформации под действием измеряемого давления  $p$  жидкости или газа.

Датчики давления характеризуются *разрешающей способностью* (рабочим диапазоном измеряемого им давления) и *чувствительностью* (отношение электрической величины на выходе датчика к давлению на входе датчика).

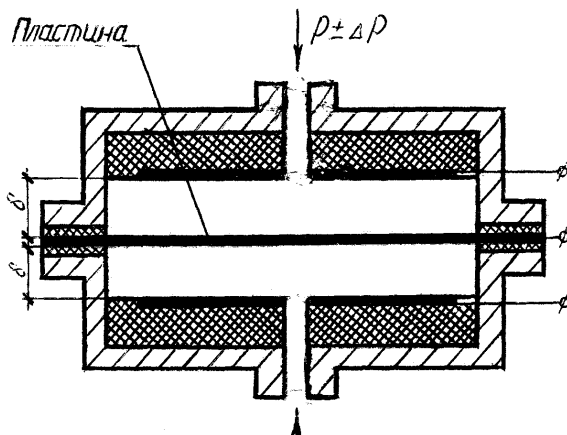


Рисунок 27

Электрические приборы находят широкое применение в системах автоматического контроля, регулирования или управления движением жидкости и газа. Незаменимы они при измерении давления в нестационарных и пульсирующих потоках жидкости и газа (при быстром изменении величины давления).

### 3. Объекты и средства исследования

Опытная установка (рис. 29) состоит из закрытой емкости 1, к которой подсоединен ряд приборов (например, пьезометр 2, водяной манометр 3, ртутный манометр 4 и пружинный манометр 5). Емкость заполнена водой, уровень которой измеряют по водомерному стеклу 7.

Пьезометр 2 измеряет давление в воде, а манометр 3, 4 и 5 — давление ее паров. Давление паров воды в емкости может быть через штуцер 6 изменено, что приведет к изменению показаний всех приборов.

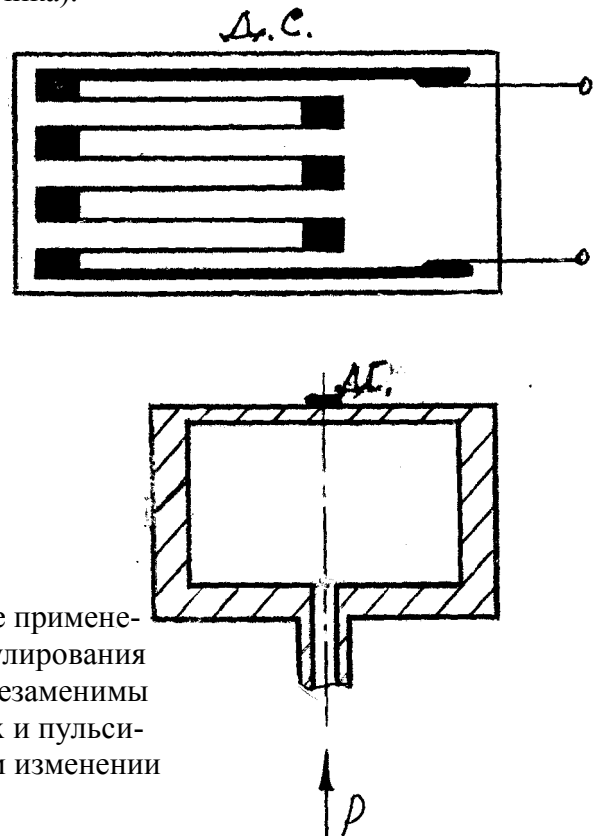


Рисунок 28

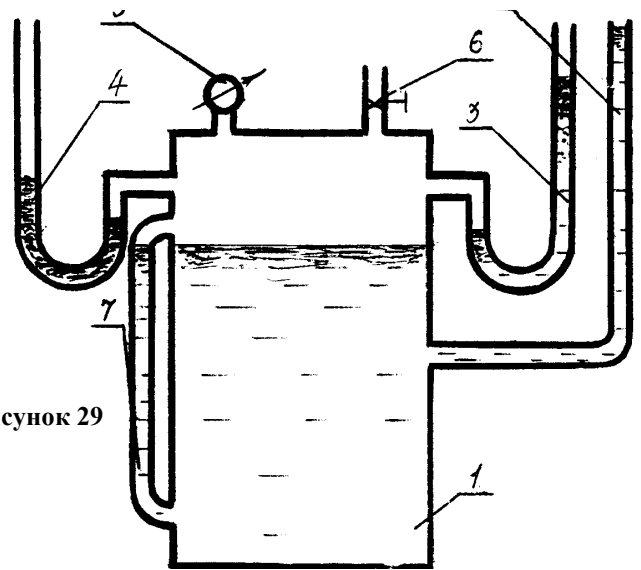


Рисунок 29

#### 4. Подготовка к работе и программа работы

1. Ознакомиться с опытной установкой.
2. С помощью ручного насоса через штуцер 6 в закрытой емкости 1 создать заданное пре-подавателем давление, отличное от атмосферного.
3. Снять отсчеты по шкалам приборов и водомерному стеклу
4. Снять отсчеты по одному из приборов с целью оценки точности измерения давления.
5. Обработать результаты измерений в соответствии с формой отчетного журнала.

#### 5. Форма отчетного журнала

##### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

#### Измерение давления в жидкости и газе

1. Схема опытной установки
2. Регистрация опытных данных
  - 2.1. Отсчет по водомерному стеклу  $z_6 =$
  - 2.2. Отсчет по пьезометру  $z_n =$
  - 2.3. Отсчет по приборам, измеряющим давление паров жидкости.

Таблица 1

№ п.п.	Название прибора	Размерность шкалы	Цена деления	Максимальный отсчет по шка- ле	Класс точности	Отсчет по шка- ле
1						
2						
3						
4						
5						
6						

#### 3. Обработка результатов опыта:

##### 3.1. Давление паров жидкости по пьезометру

$$p_0 = \rho g(z_n - z_6) =$$

##### 3.2. Пересчет отсчетов по приборам в другие единицы измерения (табл. 2)

Таблица 2

№ п.п.	Наименование прибора	Величина измеренного давления паров жидкости						
		Н/м <sup>2</sup>	кгс/см <sup>2</sup>	Па	ат.	бор	мм рт. ст.	м вод. ст.
1.								
2.								
3.								
4.								
5.								
6.								

## 4. Оценка точности измерения давления.

4.1. Название прибора.....

4.2. Единица измерения давления.....

4.3. Результаты отсчетов по шкале прибора и их обработка (табл. 3)

Таблица 3

Номер отсчета	$p$	$p - p_{cp}$	$(p - p_{cp})^2$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
	$\sum p_i =$	$\sum (p_i - p_{cp}) =$	$\sum (p_i - p_{cp})^2 =$

4.4. Среднее арифметическое значение отсчета  $p_{cp} = \sum p_i / n =$ 

4.5. Эмпирический стандарт погрешности

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (p_i - p_{cp})^2}{n - 1}} =$$

4.6. Доверительная вероятность  $P =$ 4.7. Безразмерный множитель  $t(P, n) =$ 

4.8. Доверительный интервал

$$\delta_{дов} = \pm t(P, n) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} =$$

4.9. Интервал расхождения истинного значения давления

$$p_{cp} - \delta_{дов} = \dots \leq p_{ист} \leq p_{cp} + \delta_{дов} = \dots$$

4.10. Вероятностная ошибка измерения давления

$$\delta_{\epsilon} = \pm \frac{2}{3} \sigma =$$

4.11. Максимальная доверительная ошибка измерения давления

$$\delta_{\max} = \frac{3\sigma}{\sqrt{n}} =$$

4.12. Относительная ошибка измерения давления

$$\epsilon = \pm \frac{\delta_{\epsilon}}{p_{cp}} 100\% =$$

Подпись студента

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

Работу принял

## 6. Контрольные вопросы

1. Определение и формула вычисления гидростатического давления, абсолютного давления, манометрического давления, вакуумметрического давления, избыточного давления, вакуума, разрежения, тяги.
2. Форма записи, смысл и размерность отдельных членов следующих уравнений: основное уравнение гидростатики, пьезометрическая высота и напор, гидростатический напор, закон Паскаля, вакуумметрическая высота.
3. Единицы измерения давления и соотношения между ними.
4. Вид давления, измеряемого следующими приборами: барометром, манометром, вакуумметром, мановакуумметром, дифманометром, дифпьезометром.
5. Класс точности прибора для измерения давления.
6. Схема и принцип действия жидкостных приборов: барометра, пьезометра, вакуумметра, U-образного мановакуумметра, чашечного мановакуумметра, батарейного манометра, двухжидкостного мановакуумметра, дифпьезометра, двухжидкостного микро-дифпьезометра, колокольного дифманометра, кольцевого дифманометра.
7. Правила установки жидкостных приборов для измерения давления.
8. Схема и принцип действия механических приборов: пружинных, мембранных и сильфонных манометров, вакуумметров и мановакуумметров.
9. Правила установки механических приборов для измерения давления.
10. Схема и принцип действия грузопоршневых приборов для измерения давления.
11. Чувствительность и вариация механических приборов для измерения давления.
12. Схема и принцип действия генераторных датчиков (преобразователей) давления: индукционных и пьезометрических.
13. Схема и принцип действия параметрических датчиков давления: индуктивные, емкостные, сопротивления.
14. Чувствительность и разрешающая способность электрических датчиков.



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### Измерение местных скоростей в потоке жидкости или газа.

#### 1. Цель и задачи работы.

1. Ознакомление с приборами и способами измерения скоростей в фиксированной точке потока жидкости и газа.
2. Измерение осредненных скоростей в нескольких точках одной вертикали или горизонтали открытого потока трубкой Пито-Прандтля.
3. Построение эпюры осредненных скоростей.

#### 2. Основы теории.

В установившемся турбулентном потоке жидкости или газа различают три вида местной скорости (скорости в данной точке):

- *истинную  $u$*  - непрерывно и хаотично изменяющуюся во времени по величине и направлению, что происходит под действием турбулентных возмущений в виде вихрей различных размеров и частоты;
- *мгновенную (пульсирующую)  $u_x$*  - представляющую собой проекцию истинной скорости на направление движения жидкости или газа в данном сечении; она изменяется во времени только по величине;
- *осредненную  $u_0$*  - соответствующую среднему арифметическому значению мгновенных местных скоростей за достаточно длительный, но конечный промежуток времени.

В технических задачах и исследованиях турбулентного режима течения жидкости или газа используются две местные скорости: мгновенная и осредненная, причем, первая определяется только опытным путем, а вторая - опытным путем или по эмпирическим и полуэмпирическим формулам, полученным на основе опытных замеров.

##### 2.1. Измерение мгновенной (пульсирующей) местной скорости.

Для измерения пульсирующей скорости применяются безынерционные приборы, способные не только мгновенно реагировать на величину местной скорости, но и непрерывно записывать ее хромограмму (рис.30), т.е. график изменения скорости во времени.

По конструкции и принципу действия реагирующего на скорость устройства (скоростного датчика) различают следующие виды приборов.

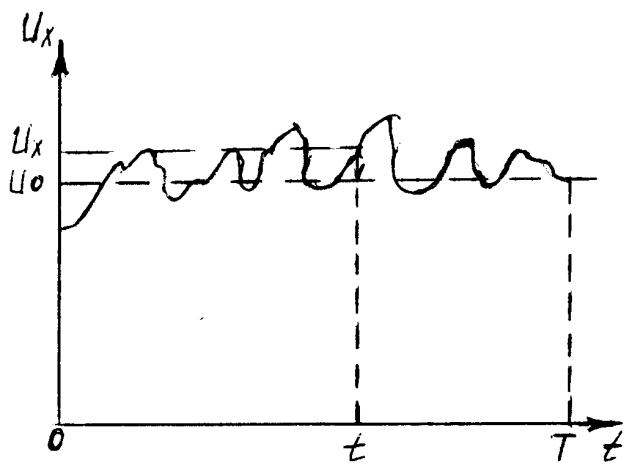


Рисунок 30

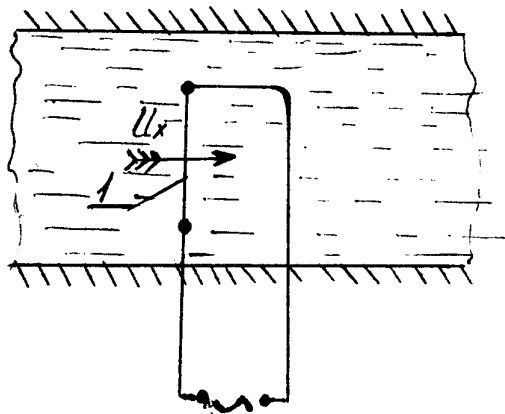


Рисунок 31

*Термоанемометры* - измеряют скорость по количеству тепла, теряемого нагреваемым телом, помещенным в поток (датчик, зонд и т.п.). Они основаны на свойстве проводников изменять сопротивление с изменением своей температуры.

Слово "анемометр" было введено М. В. Ломоносовым для обозначения прибора, из-

меряющего скорость ветра (anemos - греческое слово, в переводе - ветер).

Датчиком (зондом) служит (рис.31) проволока 1 (вольфрамовая, платиновая и т.п.), помещенная в поток жидкости или газа и разогреваемая электрическим током.

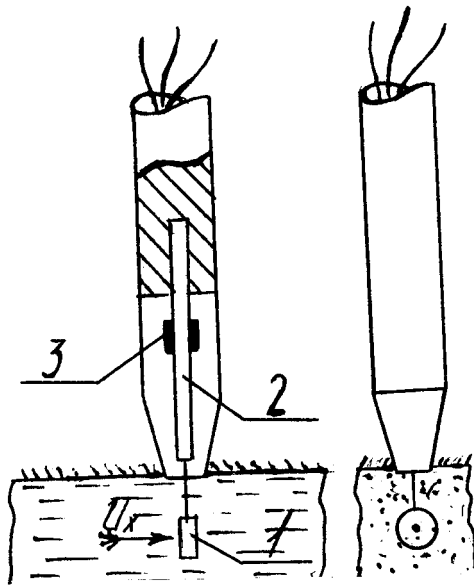


Рисунок 32

В зависимости от скорости потока происходит снос тепла, что приводит к снижению температуры проволоки, а следовательно, и к изменению ее сопротивления. Последнее или фиксируется прибором (*датчиком постоянного тока*) или вызывает изменение тока питания датчика для сохранения температуры проволоки (*датчика постоянной температуры*).

Тензоанемометры измеряют скорость по динамическому давлению, оказываемому на тензодатчик потоком жидкости или газа (так называемые тензометрические датчики скорости).

Набегающий со скоростью  $u_x$  поток жидкости или газа (рис.32) создает на приемном диске 1 силу давления, вызывающую деформацию гибкого элемента 2, на который наклеен тензодатчик 3 (см. лаб. работу №1).

Кроме приборов, для измерения пульсирующей скорости используются:

- *кинематический метод* - определяется скорость переноса ионизированных или нагретых частиц среды, освещенных или светящихся частиц и т.п., в том числе и с помощью лазера;
- *акустический метод* - определяется скорость распространения звука в потоке жидкости или газа.

## 2.2. Измерение осредненной скорости

При измерении пульсирующей скорости с записью хромограммы осредненную скорость вычисляют в результате обработки хромограммы с вычислением ее среднего значения по формуле

$$u_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_x dt. \quad (85)$$

Если целью эксперимента является определение самой осредненной скорости, то проще, удобнее и дешевле использовать инерционные приборы, способные измерить величину лишь осредненной скорости.

Наиболее распространенными приборами для измерения осредненной скорости в данной точке потока жидкости или газа являются:

- гидрометрические вертушки;
- гидрометрические трубки, насадки и зонды.

Гидрометрическая вертушка представляет собой вращающееся устройство (лопастное, чашечное, крыльчатое и т.п.), помещаемое в поток жидкости или газа и приводимое им во вращение. Скорость потока  $u_0$  в точке установки вертушки связана с угловой скоростью  $\omega$  (с числом оборотов в минуту  $n$ ) следующим соотношением:

$$u_0 = an + b, \quad (86)$$

где  $a$  - постоянная прибора, зависящая от его конструкции и размеров;  $b$  - чувствительность прибора, зависящая от трения в передачах прибора.

Гидрометрическая вертушка предварительно тарируется. По результатам тарировки

определяются значения  $a$  и  $b$  в формуле (86) и составляют тарировочный график  $u=f(n)$ . В процессе измерения осредненной скорости замеряют число оборотов  $n$  вращающегося устройства в минуту.

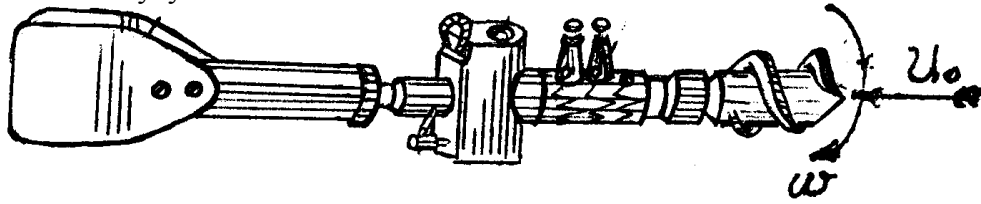


Рисунок 33

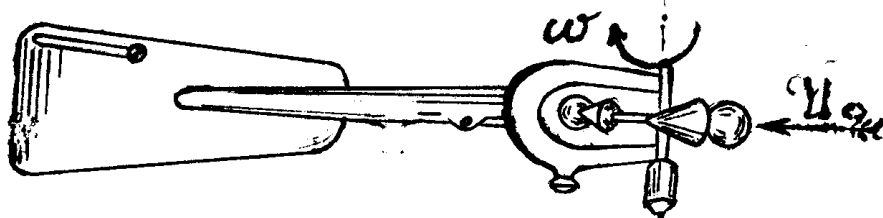


Рисунок 34

Вращающееся устройство вертушки может иметь ось вращения, совпадающую (рис.33) с направлением измеряемой скорости (вертушка системы Вользмана) или перпендикулярную (рис.34) к ней (вертушка системы Прайса). Вертушки, с помощью которых измеряют скорость в потоке газа, называют анемометрами.

Гидрометрические трубки позволяют вычислить осредненную местную скорость по величине перепада давлений в некоторых точках поверхности устанавливаемых в поток приборов, т.е. используют связь между скоростью и давлением в жидкости или газе-

Идея действия гидрометрических трубок была предложена в 1732 г. французским ученым А. Пито, который для измерения скорости открытого потока использовал стеклянную трубку, согнутую под прямым углом и обращенную своим открытым концом навстречу потоку (рис.35). Такая трубка получила название *гидродинамической трубки* (трубки полного напора). Уровень жидкости в ней поднимается выше уровня свободной поверхности на высоту  $\Delta h$ , зависящую от осредненной скорости  $u_0$ . Затем гидродинамическую трубку стали применять для измерения скорости напорного потока жидкости; в этом случае роль свободной поверхности потока выполнял пьезометр (трубка статического напора, см. рис.36). Комбинация гидродинамической трубки с пьезометром получила название *гидрометрической трубки Пито*. Замерив разницу  $\Delta h$  показаний в трубках, можно вычислить величину осредненной скорости по формуле

$$u_0 = k\sqrt{2g\Delta h}, \quad (87)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения;  $k$  - поправочный коэффициент, зависящий от конструкции или типа гидрометрической трубки (см. ниже); численное значение его изменяется от 1 до 1,05 и определяется специальной тарировкой трубки.

Для измерения осредненной скорости в потоке газа плотностью  $\rho_z$  пьезометр и гидродинамическую трубку соединяют с одним из типов дифманометров (см. лаб. работу №1), но тогда в формуле (87)

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{\rho_z g}, \quad (88)$$

где  $\Delta p$  - перепад давлений, замеряемый дифманометром.

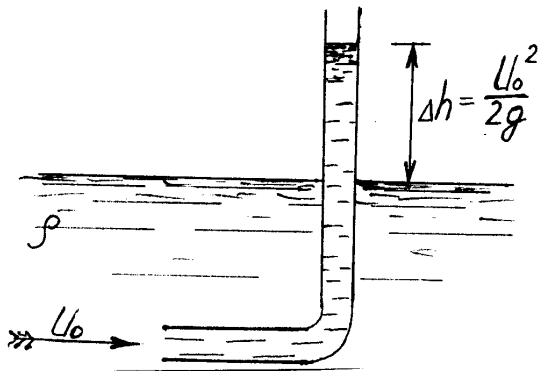


Рисунок 35

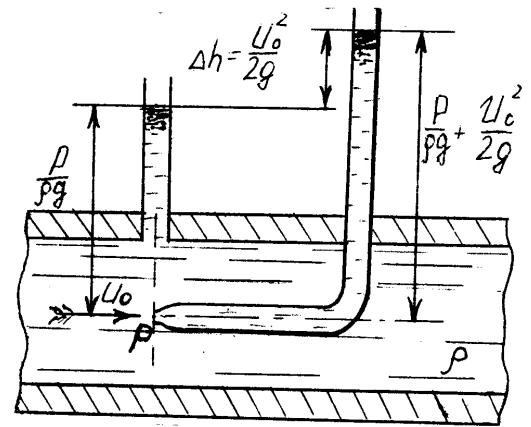


Рисунок 36

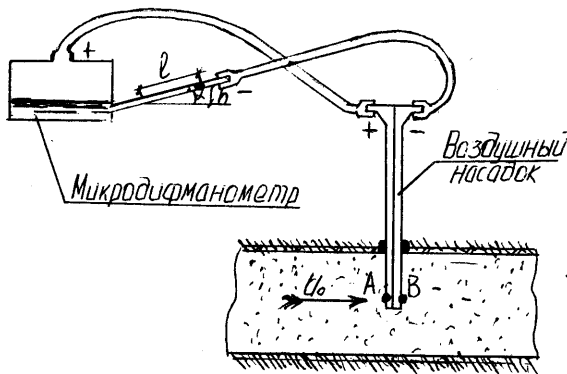


Рисунок 37

Конструктивное объединение трубок полного и статического напоров в виде спаренной цилиндрической трубки (рис.37) с двумя диаметрально расположенными отверстиями на ее боковой поверхности (A - навстречу потоку, B - с тыльной стороны) было осуществлено впервые в 1918 г. американским гидротехником Л. Гомбергером. Такой

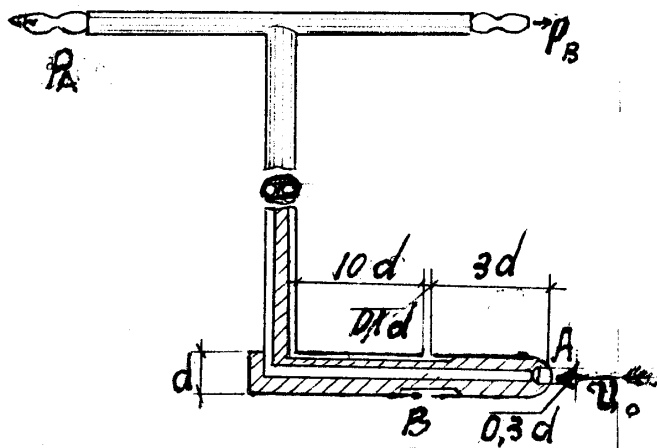


Рисунок 39

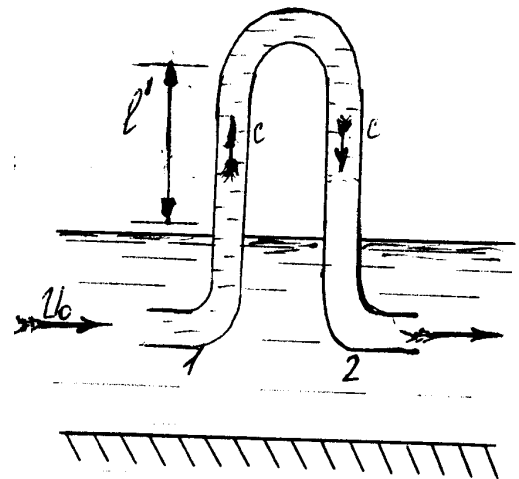


Рисунок 38

прибор получил название *гидрометрической насадки* (или *воздушной насадки* - при измерении осредненной скорости в потоке газа).

Дальнейшее развитие идея Пито получила в предложении А. И. Лосиевского полностью заполнить жидкостью гидродинамическую 1 и статическую 2 трубки (рис.38), что привело к движению жидкости по трубкам прибора со скоростью  $C$ , зависящей от скоростного напора, создаваемого осредненной скоростью потока  $u_0$ . Следовательно, измеряя скорость  $C$  на мерном участке прибора длиной  $l'$ , можно определить искомую скорость  $u_0$ .

Следовательно, измеряя скорость  $C$  на мерном участке прибора длиной  $l'$ , можно определить искомую скорость  $u_0$ .

В 1930 г. немецким гидромехаником Л. Прандтлем было предложено объединить статическую и гидродинамическую трубки в единую трубку - мундштук, направляемый навстречу потоку (рис. 39), так называемая *трубка Пито-Прандтля*. Приемное отверстие гидродинамической трубки *A* находится на торце мундштука, а статической *B* - на его боковой поверхности, трубка Пито-Прандтля получила широкое распространение для измерения осредненной скорости жидкости и газа. Разработаны ее разновидности, отличающиеся не принципом действия, а конструктивным оформлением (трубки Брабе, ЦАГИ, Ребока и др.)

Для измерения не только величины, но и направления осредненной скорости в заданной точке плоского потока используют приборы, на боковой поверхности которых расположено три отверстия (рис. 40). Одно из них (*a*) соединено с трубкой полного напора и служит для измерения скорости, а два других (*b* и *c*) расположены симметрично относительно отверстия "*a*" и служат для установки его по направлению скорости  $u_0$  (микродифманометр, подсоединенный к трубкам "*b*" и "*c*" должен показывать отсутствие перепада давлений - "ноль"). Труба *d*, соединенная с угломерным инструментом, позволяет замерить угол между направлениями потока и прибора. Такие гидрометрические приборы по-

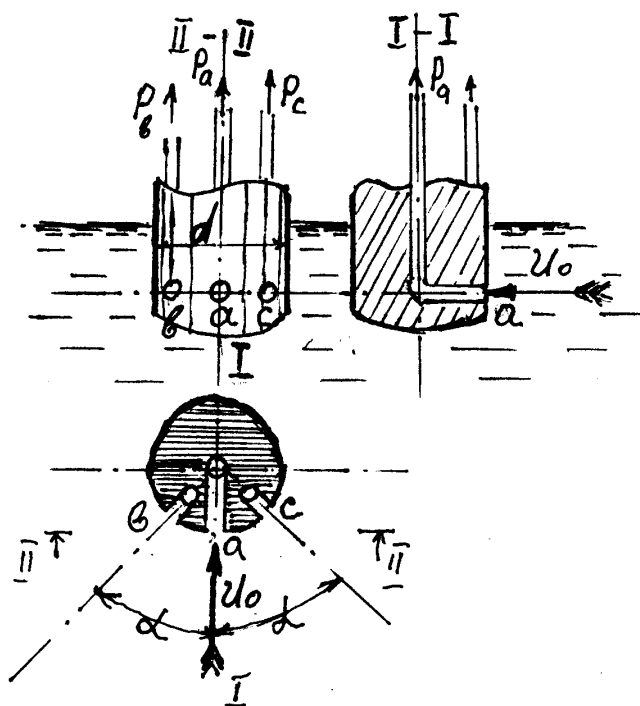


Рисунок 40

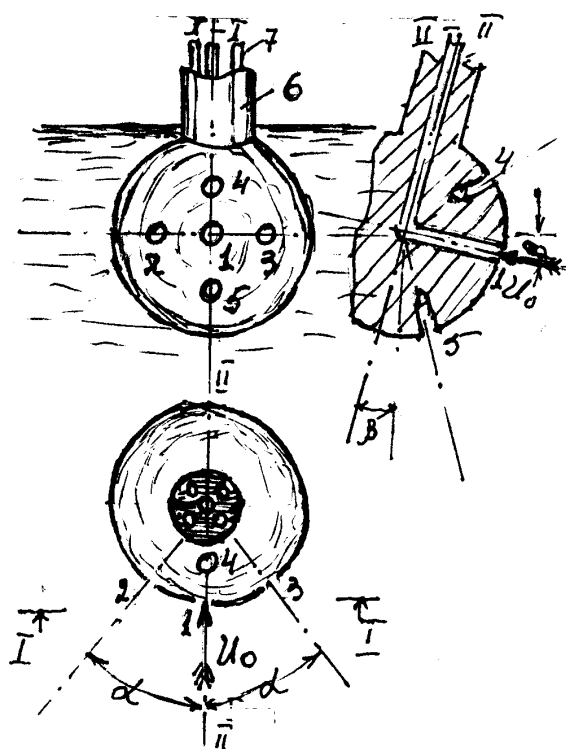


Рисунок 41

лучили название *цилиндрических зондов* (зонды Гуче, ВИГМа и др.)

Для измерения величины и направления осредненной скорости в пространственных потоках жидкости и газа используют *шаровые зонды* (Цийнена, ВИГМа и др.), приемный элемент которых выполнен в виде шара, имеющего на своей поверхности пять приемных отверстий (рис. 41); четыре из них расположены попарно (2 и 3; 4 и 5) симметрично по бокам среднего 1, имеющего ось, перпендикулярную к оси штанги 6. К каждому отверстию подсоединена своя трубка 7 ведущая к пьезометру или к дифманометру. Штанга шарового зонда соединена к угломерным инструментам, позволяющими замерить углы между центральной трубкой 1 и осью потока. Замеры углов производят в том положении шара зонда, когда попарно равны показания пьезометров, подсоединенных к отверстиям 2 и 3 ( $p_2=p_3$ ) и к отверстиям 4 и 5 ( $p_4=p_5$ ). В этом положении центральная трубка 1 будет совпадать по направлению со скоростью потока в данной точке.

### 3. Объекты и средства исследования.

Измерение осредненной скорости производят (рис. 42) в стеклянном лотке 1, вода в который подается насосами по трубе 2, расход ее регулируется вентилем 3 и замеряется

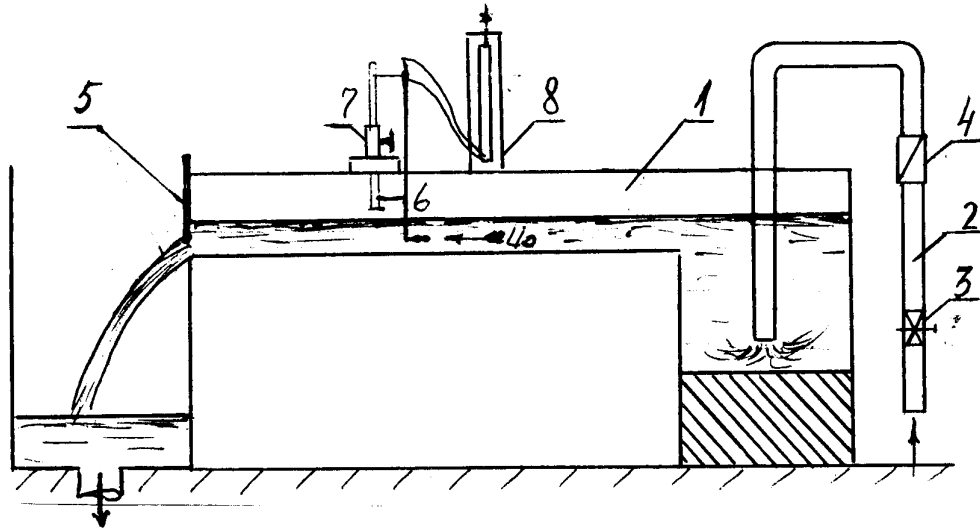


Рисунок 42

водомером 4, глубина потока воды в лотке регулируется заслонкой 5.

Замер скоростей на глубине осуществляют гидрометрической трубкой Пито-Прандтля 6, закрепленной на специальной подставке 7 так, чтобы она могла перемещаться относительно подставки вверх, вниз и поперек лотка, а вместе с подставкой - вдоль лотка.

Давление от статической и напорной трубок передается на дифференциальный манометр 8, т.е. в опыте сразу определяется величина  $\Delta h = \frac{u_0^2}{2g}$ . Для увеличения точности отсчета по

дифференциальному манометру его шкала снабжена нониусом и лупой, что позволяет замерять напор в статической и напорной трубках прибора с точностью до 0,1 мм.

### 4. Подготовка к работе и программа работы.

1. Ознакомиться с опытной установкой
2. Включить насос, подающий воду в лоток, и с помощью вентилей 3 и водомера 4 установить расход потока (по указанию преподавателя).
3. Регулируя заслонку 5 лотка, установить глубину потока (по указанию преподавателя).
4. Установить гидрометрическую трубку в заданном преподавателем сечении лотка и на одной из вертикалей (при замере скоростей по глубине потока) или одной из горизонталей (при замере скоростей по ширине потока).
5. Произвести зарядку гидродинамической трубки:
  - 5.1. надеть на горизонтальной мундштук гидрометрической трубки колпачек и опустить его в воду;
  - 5.2. ручным насосом откачать воздух и воду из дифференциального манометра до тех пор, пока не прекратится появление в стеклянных трубках дифференциального манометра пузырьков воздуха;
  - 5.3. установить уровни воды в трубках дифференциального манометра на середине его шкалы;
  - 5.4. снять с мундштука колпачок.
6. Установить отсчеты по координатным линейкам при крайних положениях гидрометрической трубки (у поверхности потока и у его дна или у левого и правого бортов лотка).
7. Наметить не менее пяти точек замера скоростей потока и вычислить их координаты.
8. Установить гидрометрическую трубку в заданную точку (по вертикали и горизонтали) и снять отсчеты по дифференциальному манометру, затем перейти в следующую точку.
9. Установить гидрометрическую трубку в заданную преподавателем точку и снять отсчеты по дифференциальному манометру с целью оценки точности вычисления осредненной скорости.
10. Обработать результаты опытов в соответствии с формой отчетного журнала

**5. Форма отчетного журнала.**  
**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2**

**Измерение местных скоростей в потоке жидкости или газа.**

1. Схема опытной установки.
  2. Эскиз гидрометрической трубки Пито-Прандтля (с простановкой размеров).
  3. Регистрация опытных данных:
    - 3.1. Диаметр гидрометрической трубки  $d =$       см.
    - 3.2. Поправочный коэффициент  $k =$       .
  - 3.3. Отчеты по координатным линейкам при крайних положениях гидрометрической трубки:
    - а) поверхность потока  $z_n =$                       см;
    - б) дно потока  $z_0 =$                       см;
    - в) левый борт лотка  $y_L =$                       см;
    - г) правый борт лотка  $y_{II} =$                       см.
  - 3.4. Глубина потока  $H = z_n + z_0 + d =$
  - 3.5. Ширина лотка  $B = y_{II} - y_L + d =$
- Измеряемые величины заносят в таблицу 1.

Таблица 1

№ пп	Измеряемая величина	Ед. изм.	Номера точки замера				
			1	2	3	4	5
3.6.	Координаты точки замера скорости:						
	а) горизонтальная $y$	см					
	б) вертикальные $z$	см					
3.7.	Отчеты по трубкам дифференциального манометра:						
	а) напорная трубка $H_H$	см					
	б) статическая трубка $H_C$	см					

4. Обработка результатов опыта(таблица 2).

Таблица 2

№пп	Вычисляемая величина	Формула	Ед.изм.	Номера точки замера				
				1	2	3	4	5
4.1	Положение точки замера скорости:							
	а) от левого борта	$v = y_c - (y_n - \frac{d}{2})$	см					
	б) глубина погружения	$h = z_n + \frac{d}{2} - z$	см					
4.2	Отсчет по дифференциальному манометру	$\Delta h = H_H - H_C$	см					
4.3	Осредненная скорость	$u = k\sqrt{2g\Delta h}$	см/с					

## 5. Эпюра осредненных скоростей (построение).

## 6. Величина средней скорости:

$$V =$$

## 7. Оценка точности вычисления осредненной скорости и

## 7.1. Точка измерения осредненной скорости №...

## 7.2. Результаты отсчета по пьезометрам и их обработка (табл. 3)

Таблица 3

Величина	Ед. изм.	Номера отсчета										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$H_H$	см											$\sum H_H =$
$H_C$	см											$\sum H_C =$
$(H_H - H_{H,cp})^2$	см <sup>2</sup>											$\sum (H_H - H_{H,cp})^2 =$
$(H_C - H_{C,cp})^2$	см <sup>2</sup>											$\sum (H_C - H_{C,cp})^2 =$

## 7.3. Среднеарифметические значения показаний пьезометров для потоков:

- напорного

$$H_{H,cp} = \frac{\sum H_H}{10} =$$

- статического

$$H_{C,cp} = \frac{\sum H_C}{10} =$$

## 7.4. Эмпирический стандарт погрешности показаний пьезометров для потоков:

- напорного

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\sum (H_H - H_{H,cp})^2}{n-1}} =$$

- статического

$$\sigma_C = \sqrt{\frac{\sum (H_C - H_{C,cp})^2}{n-1}} =$$



7.5. Доверительная вероятность  $P =$

7.6. Безразмерный множитель  $t(P, n) =$

7.7. Доверительные интервалы показаний пьезометров для потоков:  
- напорного

$$\delta_{\text{доп}, H} = \pm t(P, n) \frac{\sigma_H}{\sqrt{n}} =$$

- статического

$$\delta_{\text{доп}, C} = \pm t(P, n) \frac{\sigma_C}{\sqrt{n}} =$$

7.8. Предельная абсолютная ошибка вычисления осредненной скорости в точке № ...

$$\Delta u_{\text{пред}} = \kappa \sqrt{2g} \frac{\delta_{\text{доп}, H} + \delta_{\text{доп}, C}}{2\sqrt{H_H - H_C}} =$$

7.9. Предварительная относительная ошибка вычисления осредненной скорости в точке

$$\varepsilon_N = \frac{1}{2} \frac{\delta_H + \delta_C}{H_H - H_C} =$$

7.10. Интервал нахождения истинного значения осредненной скорости в точке №...

$$u - \Delta u_{\text{пред}} = \quad \text{см/с} < u_{\text{ист}} < u + \Delta u_{\text{пред}} = \quad \text{см/с}$$

Подпись студента

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

Работу принял

## 6. Контрольные вопросы.

1. Понятие о местной скорости: истинная, мгновенная и осредненная.
2. Схема и принцип действия термоанемометров постоянного тока и постоянной температуры и тензоанемометров.
3. Схема, принцип действия и расчетная формула гидрометрических вертушек Вользмана и Прайса.
4. Схема, принцип действия и расчетная формула гидрометрических трубок Пито, Лосиевского и Пито-Прандтля.
5. Схема, принцип действия цилиндрических и шаровых зондов.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 Определение расхода напорного потока жидкости или газа. Тарировка водомера сужающего типа 1. Цель и задачи работы.

1. Ознакомление с приборами и способами измерения расхода напорного потока жидкости или газа.

2. Определение коэффициента расходомера опытным путём .
3. Построение графика зависимости между расходом жидкости и перепадом пьезометрического напора в расходомере.

## 2. Основы теории.

Расходом называется количество жидкости или газа, проходящее через живое сечение потока в единицу времени.

Количество жидкости или газа можно выразить в единицах объёма, массы и веса; соответственно различают следующие виды расходов:

- *объёмный* -  $Q$ [объём /время];  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\text{л}/\text{с}$ ;  $\text{см}^3/\text{мин}$ ;  $\text{м}^3/\text{ч}$  (чаще всего его называют просто *расходом*);

- *массовый* -  $M$ [масса/время];  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $\text{кг}/\text{мин}$  и т.п.(связан с объёмным расходом зависимостью  $M = \rho Q$ );

- *весовой* -  $G$ [сила/время];  $\text{Н}/\text{с}$ ;  $\text{кгс}/\text{с}$  и т.п.( связан с объёмным расходом зависимостью  $G = \rho g Q$  ) .

Известны следующие способы определения расхода напорного потока:

- объёмный;
- по местной скорости потока;
- по перепаду давлений в потоке;
- по воздействию потока
- метод меток.

### 2. 1. Объёмный способ определения расхода потока

Если каким - либо способом (с помощью тех или иных счетчиков или мерного объёма) определить объём  $W$  жидкости или газа, прошедший через сечение напорного потока за известный интервал времени  $t$ , то объёмный расход потока будет

$$Q = \frac{W}{t} \quad (89)$$

Этот способ определения расхода потока является наиболее точным и широко применяется в лабораторной практике для опытных исследований или для проверок других типов расходомеров. Недостаток его в том, что выполнение замеров требует длительного промежутка времени, и поэтому его невозможно применять при измерении мгновенных расходов неустановившихся потоков.

### 2. 2. Определение расхода потока по замеренным скоростям в отдельных точках потока

При этом способе определения расхода живое сечение  $\omega$  потока разбиваются вертикальными, горизонтальными или иного типа (например, окружностями) линиями на ряд участков с площадками  $\Delta\omega_i$  (одинаковыми или разными). В центрах тяжести этих участков во время опыта замеряют одним из способов местные скорости  $u_i$  (см.лаб.раб.№2) , затем определяют расход потока :

$$Q = \sum_{i=1}^n \Delta\omega_i u_i \quad (90)$$

Этот способ применяется, как правило, в трубопроводах больших диаметров при установившемся движении жидкости или газа.

Если известна форма эпюры скоростей, т. е. известна связь между средней скоростью  $V$  и максимальной  $u_{\max}$  на оси трубы (например,  $V = k u_{\max}$  ), то процесс определения расхода можно значительно упростить, ограничившись замером одной скорости на оси трубы  $u_{\max}$  . Тогда расход потока

$$Q = k u_{\max} \omega = V \omega \quad (91)$$

Измерение осевой скорости осуществляют гидрометрическими вертушками, трубками или насадками (см. лаб. раб. №2). Такие расходомеры называют *тахиметрическими*.

### 2. 3. Определение расхода потока по переменному перепаду давлений в нём.

В напорном потоке жидкости или газа можно искусственно создать условия, при которых на коротком участке потока происходит заметное изменение давления. Учитывая, величина перепада давлений  $\Delta p$  зависит от расхода жидкости или газа, т. е. осуществляется связь  $\Delta p = f(Q)$ , можно, замерив величину перепада давлений  $\Delta p$  (как более простой технологический приём), определить расход потока, используя обратную зависимость  $Q = \varphi(\Delta p)$ .

Приборы этого типа широко распространены в промышленности и строительстве для измерения расхода потока жидкостей и газов, что объясняется их универсальностью, лёгкостью серийного изготовления, возможностью измерения расходов в широком диапазоне при значительных колебаниях давления и температуры среды. Приборы, применяемые для измерения расхода воды, называются *водомерами*.

По причинам, приводящим к созданию в потоке переменных перепадов давлений, расходомеры подразделяются:

- на сужающие устройства;
- на колена трубопроводов (коленные расходомеры);
- на местные сопротивления.

#### 2. 3. 1. Определение расхода с помощью сужающих устройств

В конце восемнадцатого века (1797 г) итальянский механик Д. Вентури, использовал совместно два уравнения: Бернулли ( $z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} = const$ ) и неразрывности

( $Q = \omega V = const$ ) - впервые обратил внимание на то, что сужение потока, приводящее к увеличению средней скорости, вызывает уменьшение давления и наоборот. Этот вывод получил название *принципа Вентури* и послужил основанием в дальнейшем для изобретений различных устройств, в том числе и для измерения расхода жидкости или газа. Американским инженером Р. Гершелем в 1881 г. был предложен для измерения расхода воды водомер (рис.43), названный им *водомером Вентури*. Позднее для сужения напорных потоков жидкости или газа стали применять более компактные устройства: сопло (рис.44), шайба-диафрагма (рис.45), сдвоенные диафрагмы (рис.46) и т. п.

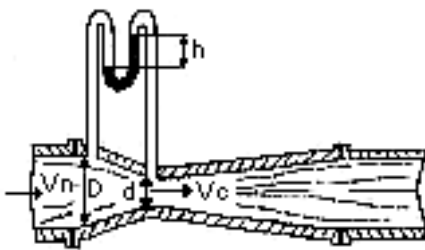


Рисунок 43

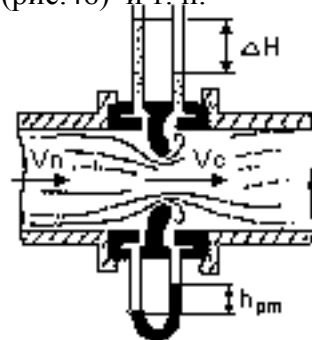


Рисунок 44

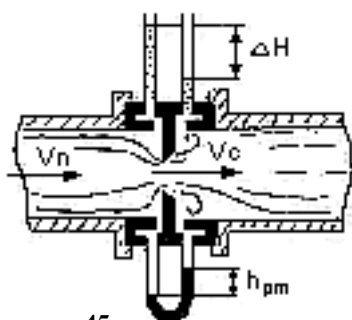


Рисунок 45

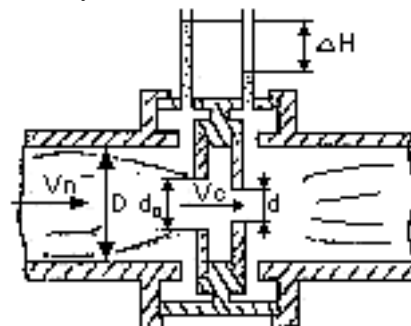


Рисунок 46

Объёмный расход  $Q$  жидкости или газа, протекающих через расходомер - сужающее устройство, может быть вычислен по формуле:

$$Q = \mu A \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho g}}, \quad (92)$$

где

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2g}{\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1}} \quad - \text{постоянная расходомера};$$

$D$ -диаметр трубопровода;

$d$ - диаметр горловины расходомера; □

$\Delta p$  - перепад давлений в расходомере;

$\rho$  - плотность жидкости или газа;

$\mu$  - коэффициент расхода прибора, учитывающий влияние гидравлических сопротивлений, зависящий от геометрических размеров и схемы расходомера и определяемый опытным путём.

Численно представляет собой отношение действительного расхода  $Q$  к теоретическому  $Q_T$ , вычисленному без учёта потерь напора потока, т.е.  $\mu < 1$  и тем меньше, что больше гидравлическое сопротивление расходомера.

Если перепад давлений  $\Delta p$  измеряется по пьезометрам или по дифпъезометру, то  $\frac{\Delta p}{\rho g} = \Delta H$  - разница показаний пьезометров (отсчёт по дифпъезометру). Если же перепад давлений измеряется по дифманометру (отсчёт равен  $h_{DM}$ ), заполненному жидкостью плотностью  $\rho_m$  (причём  $\rho_m > \rho$ ), то

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = h_{DM} \left( \frac{\rho_m}{\rho} - 1 \right) \quad (93)$$

Достоинством сужающих устройств является высокая точность измерения расхода, а недостатком - дополнительные сопротивления, а значит, и потери напора потока.

Для измерения малых расходов газа используются микрорасходомеры сужающего типа - *реометры* (рис .47) . Газ, протекающий по трубке 1, проходит через сужение - сопротивление 2 в виде капилляра или диафрагмы. Перепад давления, образующийся при протекании газа, измеряется дифманометром 4. Камера 3 служит для предотвращения выброса рабочей жидкости дифманометра при случайных возрастания перепада давления.

### 2. 3. 2. Измерение расхода потока с помощью коленных расходомеров

При повороте потока жидкости или газа в колене трубопровода вследствие криволинейного характера течения нарушается гидростатичность распределения давления по поперечному сечению ( $z + \frac{P}{\rho g} \neq \text{const}$ ), т.е. возникает перепад давления в двух диаметрально противоположных точках (рис .48). Как правило, в вогнутой части колена (точка 1) давление меньше, а в выпуклой - больше ( $P_1 < P_2$ ).

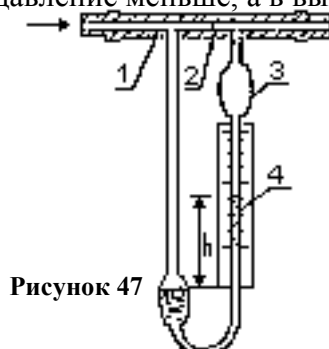


Рисунок 47

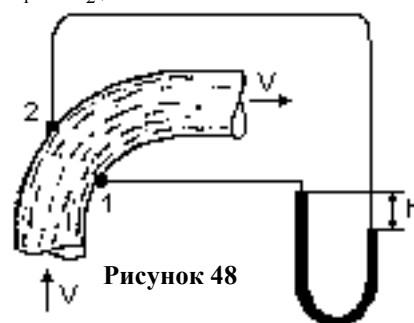


Рисунок 48

Перепад давлений  $\Delta p$  зависит от скорости потока, следовательно, и от его расхода.

Экспериментально установлено (в виде таблицы, графика или формулы) связь возникающего перепада давления  $\Delta p$  от пропускаемого расхода  $Q$  позволяет обратным путем вычислить расход, если известно показание дифманометра, т.е. использовать имеющееся на трубопроводе колена в качестве расходомера, что является достоинством такого типа расходомера. Недостаток его - влияние различных, даже случайных возмущений потока на характер его протекания по колену трубопровода, следовательно, и не высокая надежность ранее установленной опытной зависимости между расходом  $Q$  и перепадом давления  $\Delta p$ . Поэтому коленные расходомеры применяются для технологического контроля за расходом потока жидкости или газа, когда высокой точности определения не требуется.

### 2. 3. 3. Определение расхода потока с помощью местных сопротивлений.

Любое местное сопротивление (поворот, вход в трубу, изменение диаметров и т. д.), величина коэффициента местного сопротивления  $\zeta$  которого определена и мало изменяется в ожидаемом диапазоне изменения расхода, может быть использовано в качестве расходомера. Расчётную зависимость в этом случае получают путём преобразования формулы Вейсбаха к виду

$$Q = B \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho g}}, \quad (94)$$

где  $B = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2g}{\zeta}}$  - постоянная расходомера;  $d$  - диаметр трубы.

Заметим, что данного типа расходомеры работают тем точнее, чем больше их коэффициент местного сопротивления  $\zeta$ : (в этом случае увеличиваются местные потери напора  $\frac{\Delta p}{\rho g}$ ).

Расходомеры с переменным перепадом давлений должны тарироваться на месте их непосредственной установки на трубе, так как потери напора в них (следовательно, и измеренный перепад давлений) во многом зависит от условий протекания жидкости или газа (наличие поворотов, завихрений и т.п.). Наиболее устойчивые зависимости перепада давлений от расхода получаются при наличии прямолинейных участков как до расходомера (не менее 30 диаметров), так и после него (не менее 10 диаметров трубопровода). В результате тарировки получают значение опытных коэффициентов или тарировочной кривой  $Q = \varphi(\Delta p)$

## 2. 4. Определение расхода потока по результатам его воздействия на расходомеры.

Воздействие потока жидкости или газа на прибор - расходомер может быть *контактным* и *бесконтактным*. Отсюда и название расходомеров.

### 2.4.1 Контактные расходомеры.

К контактными расходомерам относятся расходомеры обтекания, состоящие из тела (поплавка, диска, поршня или крыла), которое воспринимает динамическое давление обтекающего его напорного потока и перемещается (или поворачивается) в зависимости от расхода. Величина перемещения тела на шкале расходомера градуирована в размерности расхода.

Наиболее распространённым типом контактного расходомера является *ротаметр*, измеряющий расход потока жидкости или газа с помощью поплавка, свободно перемещающегося внутри вертикально конусной стеклянной трубки (рис.49). Действие ротаметра основано на том, что поплавок находится в состоянии витания под действием силы тяжести  $G$  и силы гидродинамического давления  $P$ , создаваемой восходящим (направленным

вверх) потоком. Последняя возрастает с увеличением расхода, что способствует подъёму поплавка в вертикальное сечение, в котором кольцевое сечение между стенками конической трубы и телом поплавка создаёт силу гидродинамического давления, равную силе тяжести. При этом перепад давления по обе стороны поплавка остаётся постоянным (масса поплавка не изменяется). Поэтому ротаметры иногда называют *расходомерами с постоянным перепадом давлений*. Как правило, шкала высоты положения поплавка градуируется в размерах расхода потока жидкости или газа. Схема подключения ротаметра 1 к вертикальной (а) или горизонтальной (б) трубе с помощью центрирующей вставки 2 показана на рис.50.

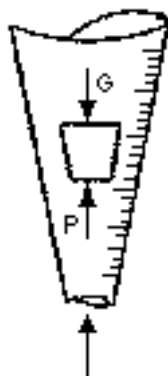


Рисунок 49

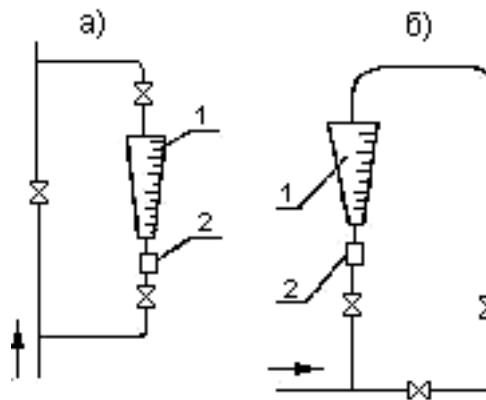


Рисунок 50

В последнее время появились *вихревые расходомеры*, принцип действия которых основан на измерении частоты колебаний параметров потока при вихреобразовании. При этом вихри возбуждаются или с помощью плохо обтекаемого тела (образуются вихревые дорожки Кармана) или путём закручивания потока специальными устройствами (рис.51).



Рисунок 51

Частота следования вихрей в дорожке зависит от скорости жидкости, а значит, от расхода и от её вязкости. Возникающие при этом перепады давлений воспринимаются приёмниками, чаще всего пьезодатчиками, расположенными в стенках корпуса расходомера, установленного на напорном трубопроводе.

#### 2.4.2 Бесконтактные расходомеры.

К бесконтактным расходомерам относятся приборы, измеряющие не параметры самого потока, а результаты его воздействия:

- на внешнее магнитное поле (электромагнитные или индукционные расходомеры);
- на ультразвуковые колебания (ультразвуковые и электроакустические).

Принцип действия *электромагнитных расходомеров* основан на изменении электродвижущей силы, индуцируемой в потоке электропроводной жидкости, пересекающей магнитное поле (рис.52). Отрезок трубы 1, по которой протекает жидкость, расположен между полюсами электромагнита 2, катушка которого подсоединена к источнику питания 3. При протекании в трубе жидкость пересекает силовые линии магнитного поля. При этом в жидкости, как в движущемся проводнике, индуцируется ЭДС, которая снимается двумя электродами 4, расположенными в одном поперечном сечении с полюсами магнита, но под углом 90 град к направлению магнитных силовых линий. Индуцируемая ЭДС пропорциональна скорости пересечения проводником магнитного поля, т.е. расхода потока жидкости. Её изменения фиксируются на хромограме или на шкале приемного прибора 5.

Ультразвуковые расходомеры основаны на способности движущейся жидкости передавать ультразвуковые колебания (УЗК), причём скорость их зависит от скорости потока, следовательно, и от его расхода.

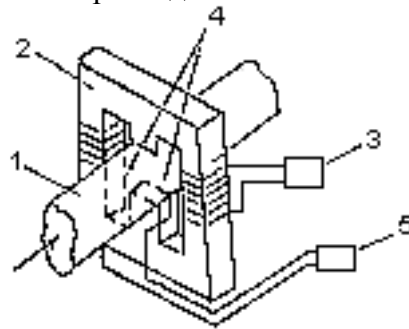


Рисунок 52

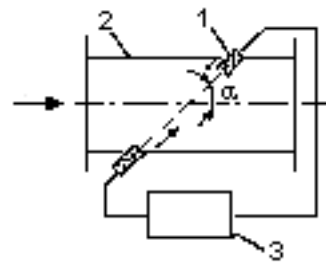


Рисунок 53

Принцип их действия основан на использовании преобразователей 1, установленных на стенках трубы 2 и направляющих луч УЗК под углом  $\alpha$  к оси потока попеременно по потоку или против него. Разница времени прохождения расстояния между преобразователями фиксируется измерительным прибором 3 (рис.53).

Все типы расходомеров, использующих результаты воздействия потока на элементы прибора, подвергаются предварительной тарировке.

### 2.5.Определение расхода потока методом меток.

Сущность метода заключается в измерении специальной меткой (соляным облаком, порцией красителя, дозой радиоактивного вещества и т.п.) времени прохождения потоком фиксированного участка трубопровода постоянного диаметра (рис.54).

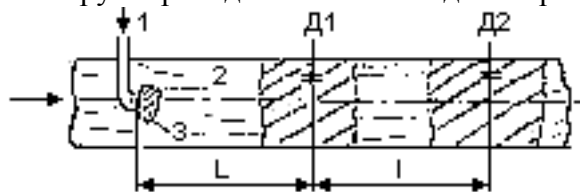


Рисунок 54

Через специальную трубку 1 в напорный поток 2 впрыскивается “метка” 3, которая движется вместе с потоком и на расстоянии  $L=70 D$  полностью перемешивается с потоком (на всём его сечении). Затем детекторами  $D_1$  и  $D_2$ , расположенными на расстоянии  $l$  друг от друга, фиксируется время  $t_1$  и  $t_2$  прохождения центра метки через свои сечения.

Расход напорного потока будет

$$Q = \omega \frac{l}{t_2 - t_1} \quad (95)$$

где  $\omega$  - площадь сечения потока в трубе.

### 3. Объекты и средства исследования.

Объектом исследования является суживающее устройство - нормальная диафрагма 1 (водомерная шайба) диаметром  $d$ , помещённая в трубопровод 2 диаметром  $D$ .

Диафрагма оборудована двумя пьезометрами 3. Вода в трубопровод поступает из напорного бака 4, уровень в котором поддерживается постоянным в течение опыта. Расход регулируется при помощи вентиля 5 и замеряется путем наполнения мерного объема  $W$  за время  $t$  (рис.55).

Расходомер подвергается тарировке, цель которой - определение опытного коэффициента (так называемого *коэффициента расхода*  $\mu$ ), входящего в расчётные формулы (см.п.2), и построение по результатам опытов графика зависимости расхода потока жидкости от потери напора  $\Delta H$  (так называемая тарировочная кривая). Для этого в каж-

дом опыте измеряется объёмным способом расход воды  $Q$ , и соответствующий ему перепад пьезометрического напора  $\Delta H$ .

Тогда искомый коэффициент расхода:

$$\mu = \frac{Q}{A\sqrt{\Delta H}} \quad (96)$$

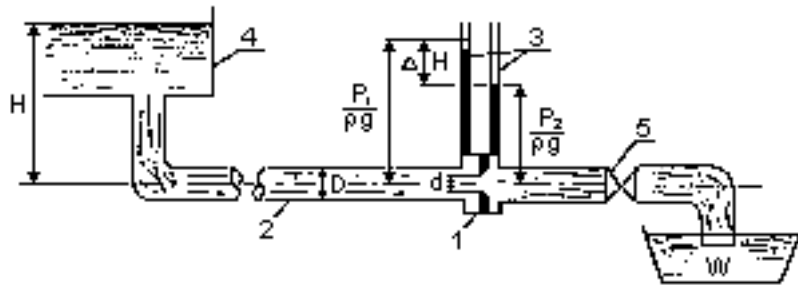


Рисунок 55

Проведя серию опытов, определяют среднее значение  $\mu_{cp}$  и строят тарировочную кривую  $Q=f(\Delta H)$ .

#### 4. Подготовка к работе и программа работ.

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Составить эскиз расходомера с простановкой всех основных размеров сужающего устройства.
3. Регулирующим вентилем установить расход потока жидкости.
4. Замерить показания пьезометров.
5. Определить время  $t$  заполнения объема  $W$  воды.
6. Обработать опытные данные в соответствии с формой лабораторного журнала.

#### 5. Форма отчетного журнала ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

### Измерение расхода напорного потока жидкости или газа

#### Тарировка водомера сужающего типа

1. Схема опытной установки.
2. Эскиз расходомера (с простановкой размеров).
3. Регистрация опытных данных (таблица 1)
  - 3.1. Тип тарируемого расходомера:
  - 3.2. Размеры расходомера:
    - диаметр перед сужением  $D =$  см;
    - диаметр горловины расходомера  $d =$  см.

Измеряемые в опытах величины

Таблица 1.

№ п/п	Измеряемая величина	Ед. изм.	Номера опытов					
			1	2	3	4	5	6
3.3	Показания пьезометров: - перед сужением $H_{n1} = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g}$ - в горловине $H_{n2} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g}$	см см						
3.4	Объем воды, поступающей в мерный сосуд, $W$	см <sup>3</sup>						
4.5	Время наполнения объема, $t$	с						



## 4. Обработка результатов опыта (таблица 2):

$$4.1 \text{ .Постоянная расходомера } A = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2g}{\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1}} = \dots\dots \text{ см}^{2.5} / \text{с}$$

Таблица 2.

№ п/п	Вычисляемая величина	Формула	Ед. Изм.	Номера опытов					
				1	2	3	4	5	6
4.2	Расход потока	$Q = \frac{W}{t}$	$\text{см}^3 / \text{с}$						
4.3	Перепад напора в расходомере	$\Delta H = H_{II1} - H_{II2}$	$\text{см}$						
4.4	Коэффициент расхода расходомера из опыта	$\mu = \frac{Q}{A\sqrt{\Delta H}}$	-						

## 5. Среднее значение коэффициента расхода расходомера на всей серии опытов:

$$\mu_{cp} =$$

6. Определение параметров аналитического уравнения  $Q = a(\Delta H)^b$  тарировочной кривой методом “средних”.

## 6.1 Обработка результатов опыта

Таблица 3

Величины	Номера опытов						Сумма величин	
	1	2	3	4	5	6	в нечетных опытах	в четных опытах
$Q, \text{см}^3 / \text{с}$							-	-
$Y_{оп} = \lg Q$							$K_{II} =$	$K_{II} =$
$\Delta H, \text{см}$							-	-
$X_{оп} = \lg \Delta H$							$K_{III} =$	$K_{IV} =$

## 6.2 Расчетная система уравнений

$$\left. \begin{aligned} 3A + K_{III} \cdot B &= K_I \\ 3A + K_{IV} \cdot B &= K_{II} \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

## 6.3 Результаты решения системы уравнений

$$A = \quad , \quad B =$$

## 6.4 Параметры уравнения тарировочной кривой

$$a = 10^A = \quad ; \quad b = B =$$

## 6.5 Уравнение опытной тарировочной кривой

$$Q = \quad ; \quad H =$$

## 7 Опытные точки и тарировочная кривая исследованного водомера

Подпись студента  
Работу принял

“\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

## 6. Контрольные вопросы.

1. Понятие о расходе потока, его виды и единицы измерения.
2. Связь между объёмным, массовым и весовым расходами.
3. Объёмный способ измерения расхода жидкости.
4. Тахиметрический способ измерения расхода.
5. Схема, принцип действия и расчётная формула расходомера сужающего типа : водомер Вентури, водомерное сопло, диафрагма, сдвоенная диафрагма, реометр.
6. Коэффициент расхода и постоянная расходомера сужающего типа.
7. Схема и принцип действия коленного расходомера.
8. Схема, принцип действия и расчётная формула для определения расхода с помощью местных сопротивлений.
9. Типы расходомеров с переменным перепадом давления .
10. Схема и принцип действия контактных расходомеров : ротаметра, вихревого расходомера.
11. Схема и принцип действия бесконтактных расходомеров : электромагнитных и ультразвуковых.
12. Схема и принцип измерения расхода потока методом меток.
13. Правила установки расходомеров.
14. Правила построения и использования тарировочной кривой расходомера.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 Определение расхода открытого потока. Тарировка мерного водослива.

### 1. Цель и задачи работы.

1. Ознакомление со способами измерения и вычисления расхода открытого потока жидкости.
2. Построение тарировочной кривой мерного водослива.
3. Определение постоянной мерного водослива.

### 2. Основы теории.

В зависимости от размеров поперечного сечения русла водотока и величины расхода открытого потока применяют следующие способы определения расхода:

1. Измерение местных скоростей потока и вычисление по ним величины расхода.
2. Определение величины расхода потока по результатам.

#### 2. 1. Определение расхода потока по местным скоростям.

Этот способ применяется, как правило, для вычисления величины расхода воды в реках и больших каналах.

Створ (живое сечение) потока разделяется вертикалями на элементарные полосы (рис.56). Уровень наблюдений (УН) принимается за плоскость отсчёта глубин потока  $h_i$ .

На каждой вертикали тем или иным способом (см. лаб. раб. № 2) в нескольких точках измеряются местные скорости потока  $u$ . Результаты этих измерений позволяют путём их соответствующей обработки вычислять величину расхода  $Q$  потока. Возможны два варианта обработки результатов замера местных скоростей:

1. Вычисление *элементарных расходов*  $q$  (расход потока, приходящийся на единицу ширины его сечения).
2. Построение *изотак* (линий равных местных скоростей в пределах сечения потока).

В первом варианте строят эпюры скоростей на вертикали (рис.57), площади которых  $S_u$  равны значениям соответствующих элементарных расходов:

$$q = \int_0^h u dh \cdot 1 \quad (97)$$

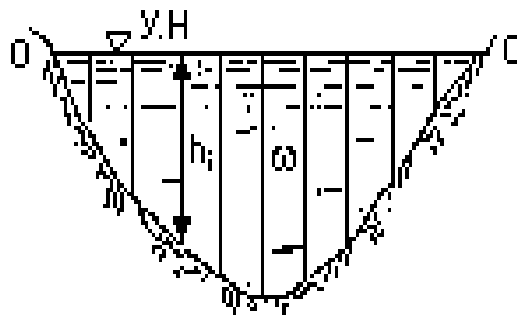


Рисунок 56

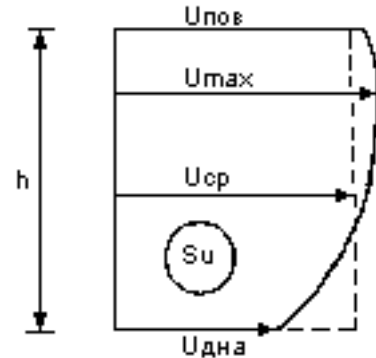


Рисунок 57

Попутно можно вычислить и среднюю на вертикали скорость  $u_{cp}$ :

$$u_{cp} = \frac{q}{h} \quad (98)$$

По значениям элементарных расходов  $q_i$  строят их эпюру по ширине поверхности потока (рис.58). Площадь эпюры элементарных расходов  $S_q$  будет равняться искомому расходу  $Q$  потока.

Во втором варианте на площади живого сечения потока  $\omega$  строят изотак и определяют части площади сечения потока, находящиеся между двумя соседними изотаксами (рис.59).

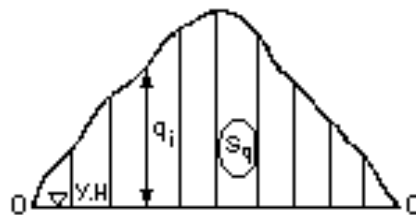


Рисунок 58

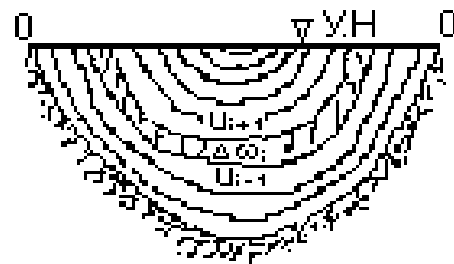


Рисунок 59

Тогда часть расхода потока  $\Delta Q_i$ , приходящиеся на площадь сечения  $\Delta \omega_i$ , составит  $\Delta Q_i = \frac{u_{i-1} + u_{i+1}}{2} \Delta \omega_i$ , а расход всего потока:

$$Q = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \quad (99)$$

## 2.2. Измерение расхода потока с помощью динамометров.

Если в канале или лотке поставить водопроницаемую или обтекаемую преграду, то вода, протекая сквозь или вокруг неё, будет оказывать на неё определенную силу воздействия, значение которой зависит от расхода.

Оценить силу воздействия воды на преграду можно путём выполнения преграды (рис.60) в виде динамометра, который удерживается в вертикальном положении пружи-

ной или грузами - противовесами, а под действием силы воздействия потока отклоняется от вертикального положения, поворачиваясь вокруг неподвижной оси 0 на угол  $\alpha$ .

Немецкий гидравлик О.Пебинг в 1922 году предложил преграду выполнять в виде решетки, качающейся вокруг оси, укрепленной на бортах лотка (рис.61), а русский гидравлик П.П. Уткин в 1951 году предложил преграду выполнять в виде пластины переменной ширины, качающейся относительно оси, расположенной над потоком (рис.62). Для каждого типа динамометров строят тарировочную кривую  $Q = f(\alpha)$ , с помощью которой после замера угла  $\alpha$  определяют расход потока.

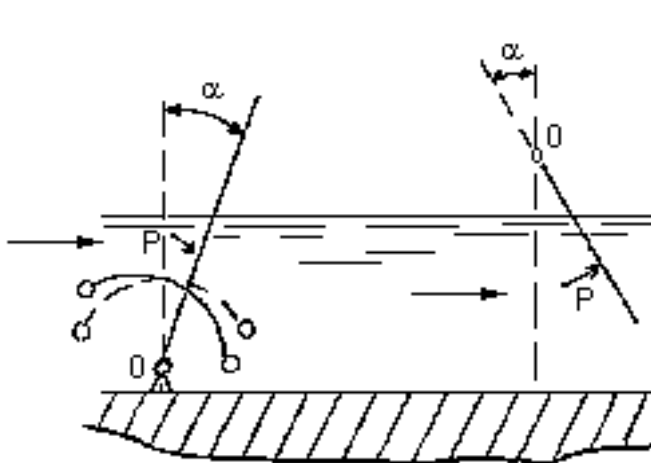


Рисунок 60

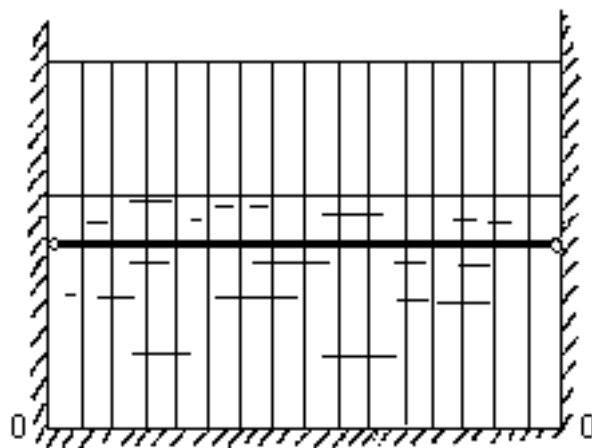


Рисунок 61

### 2.3. Определение расхода потока измерительными лотками.

Измерительные лотки представляют собой сооружения на каналах и лотках, вызывающие сжатие потока и, как следствие, перепад уровней воды (образуют верхний и нижний бьефы). Сжатие потока может осуществляться либо в плане (рис.63) в виде двухстороннего бокового сжатия (*лоток Вентури*), либо по вертикали (рис.64) в виде низкого водослива практического профиля криволинейного или полигонального очертания (*лоток Вентури с порогом*), либо комбинацией обоих приемов сжатия потока.

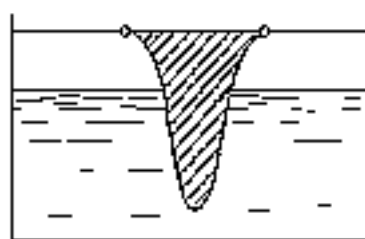


Рисунок 62

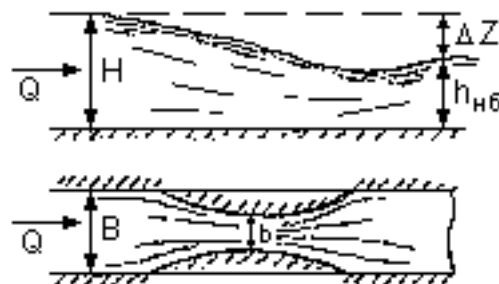


Рисунок 63

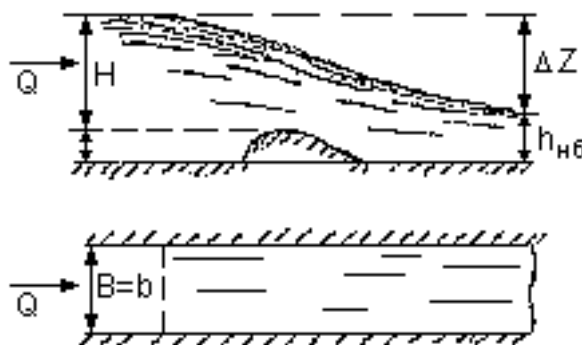


Рисунок 64

Во всех случаях степень сжатия потока по высоте и в плане должна быть такой, чтобы при всем возможном диапазоне измерений расхода открытого потока  $Q$  обеспечивалось свободное (незатопленное нижним бьефом) истечение, когда глубина потока в верхнем бьефе  $H$  зависит только от его расхода  $Q$ . Впервые такой способ измерения расхода открытого потока был предложен в начале двадцатого столетия в Англии, и лотки получили название “*вентуриканал*”, “*открытый расходомер Вентури*” “*вентурилок*”.

Для измерения расхода жидкостей с высокой концентрацией механических примесей применяют (так называемые усовершенствованные лотки Вентури). Наиболее распространёнными из них являются лотки *Паршалья* (рис.65) и лоток *САНИИРИ* (рис.66).

Расход потока определяют в измерительных лотках в зависимости от глубины  $H$  его по формуле

$$Q = MbH^n, \quad (100)$$

где  $n$  - показатель степени;  $M$  - постоянная измерительного лотка.

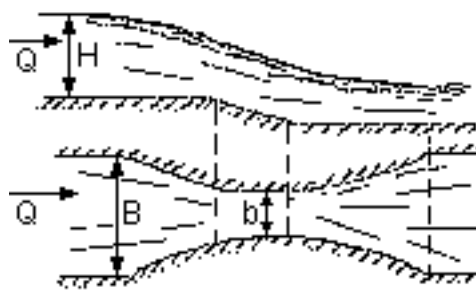


Рисунок 65

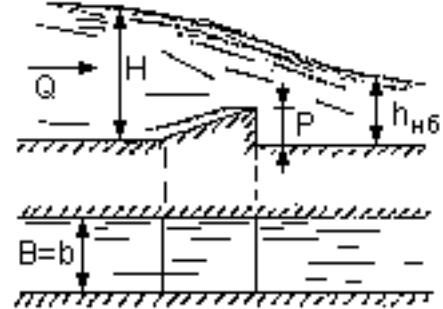


Рисунок 66

Обе эти величины ( $n$  и  $M$ ) зависят от типа лотка и его размеров и определяются опытным путём при тарировке лотка.

#### 2. 4. Измерение расхода потока мерными водосливами.

Для измерения расхода воды в лотках, каналах и небольших водотоках используются водосливы с тонкой стенкой, ширина порога  $\delta$  которых настолько мала, что не влияет на форму переливающейся через него струи воды. Опыты показывают что это возможно при соблюдении условия  $\delta \leq 0,67H$ ,

где  $H$  - напор над гребнем водослива (рис.67),  $H = z_{г.б} - z_{с.б}$

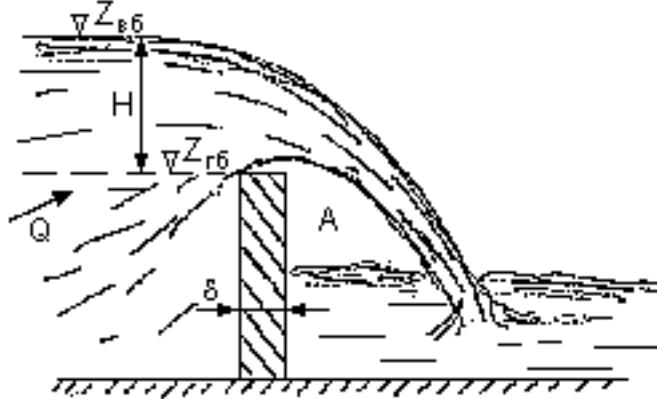


Рисунок 67

Водосливы с тонкой стенкой нашли широкое применение в качестве измерителей расхода открытых потоков в лотках, каналах и водотоках. Поэтому их часто называют *мерными водосливами*.

Если определить (аналитически или опытным путём) связь между расходом потока  $Q$  и напором водослива  $H$ , то, замеряя величину потока  $H$  (точнее, отметку уровня воды в верхнем бьефе  $z_{г.б}$ ), можно вычислить расход потока.

Характер функции  $Q=F(H)$  зависит от формы водосливного отверстия. Наибольшее распространение получили следующие формы водосливного отверстия: треугольная (рис.68,а), прямоугольная (рис.68,б) трапецевидная (рис.68,в), параболическая (рис.68,г).

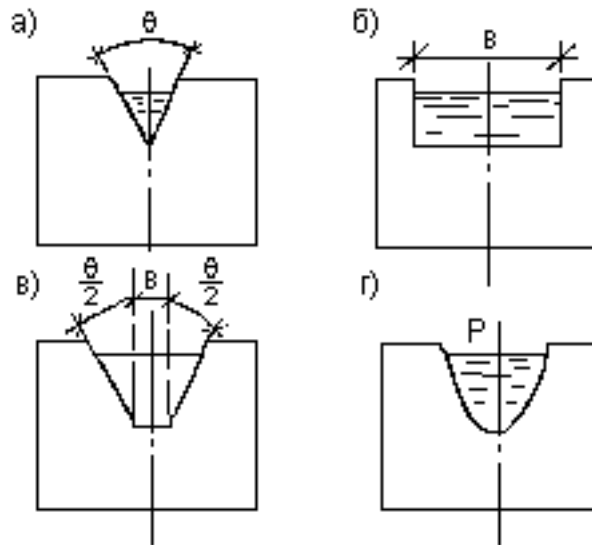


Рисунок 68

Аналитическая связь между расходом безнапорного потока  $Q$  и напором  $H$  над гребнем мерного водослива такова:

- для треугольного водослива

$$Q = m\sqrt{2g}tg \frac{\theta}{2} H^{5/2} \quad (101)$$

- для прямоугольного водослива

$$Q = mb\sqrt{2g}H^{3/2} \quad (102)$$

- для трапецевидного водослива

$$Q = m\sqrt{2g}tg \frac{\theta}{2} H^{5/2} \left(1 - \frac{4b}{5H}\right) \quad (103)$$

- для параболического водослива, описанного по формуле  $y = 2px^2$

$$Q = m\sqrt{2g}\sqrt{p}H^2 \quad (104)$$

В этих формулах  $g$  - ускорение свободного падения,  $m$  - коэффициент расхода водослива.

Для водосливов заданных размеров и форм расчетная формула может быть записана следующим образом

$$Q = MH^n, \quad (105)$$

где  $n$  - показатель степени, зависящий от типа водослива;

$M$  - постоянная соответствующего водослива.

Коэффициент расхода  $m$  (а значит, и постоянную водослива  $M$ ) определяют опытным путем. Процесс ее определения называется *тарировкой мерного водослива*. Результаты тарировки часто изображают в виде кривой  $Q = f(H)$  - тарировочной кривой мерного водослива (рис.69). Использование ее позволяет наиболее просто определить расход открытого потока.

Для обеспечения устойчивости процесса истечения через мерный водослив (стабильности его коэффициента расхода, следовательно, и постоянной водомера) необходимо соблюдать следующие условия:

1. Малые скорости подхода к водосливу  $\left(\frac{V_0^2}{2g} \ll H\right)$ , т.е. ее скоростной напор должен быть значительно меньше величины напора. Если это условие не выполняется, то в расчетные формулы (100)-(105) должен подставляться исправленный напор с учетом скорости подхода:

$$H_0 = H + \frac{V_0^2}{2g} \quad (106)$$

2. Постоянство давления воздуха под переливающейся струей (в зоне А, на рис. 67), что достигается свободным доступом воздуха под струю.

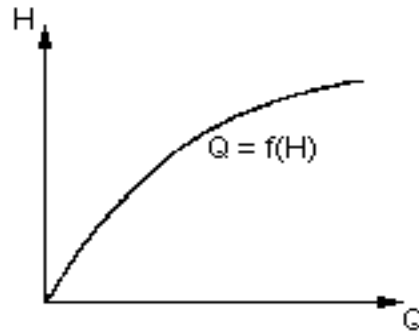


Рисунок 69

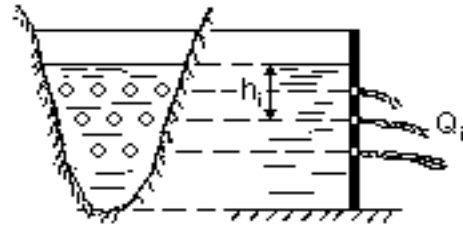


Рисунок 70

Разновидностью мерных водосливов является *водомерный щит Игнатова* (рис. 70), представляющий собой дырчатую перегородку с заданным числом и размерами отверстий и их расположением на щите. В зависимости от ожидаемого расхода водотока открывают то или иное количество отверстий.

Расход через каждое из открытых отверстий находится так:

$$Q_i = \mu \omega_i \sqrt{2gh_i}, \quad (107)$$

где  $\mu$  - коэффициент расхода отверстий,

$\omega$  - площадь отверстия,

$h$  - напор истечения данного отверстия,

$g$  - ускорение свободного падения.

$$\text{Общий расход: } Q = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (108)$$

где  $n$  - число открытых отверстий.

### 3. Объекты и средства исследования

Лабораторная работа проводится в гидротехническом лотке 1 со стеклянными стенками (рис 71). Вода в лоток подается насосом по напорному трубопроводу 2; расход воды регулируется задвижкой 3 и измеряется водомером 4.

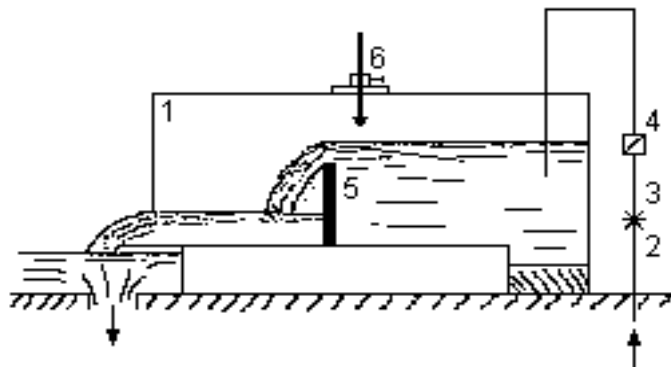


Рисунок 71

Внутри лотка устанавливается мерный водослив с тонкой стенкой 5. Отметки гребня водослива  $Z_{гв}$  и уровня воды в верхнем бьефе  $Z_{бб}$  измеряются мерной иглой 6.

#### 4. Подготовка к работе и программа работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Установить мерную иглу  $b$  над гребнем водослива и замерить отметку последнего  $Z_{вб}$
3. Передвинуть мерную иглу на 15 см в сторону верхнего бьефа и измерить отметку дна лотка  $Z_0$
4. Открыть вентиль  $3$  и установить расход потока (по указанию преподавателя)
5. По секундомеру определить время  $t$  прохождения через водомер  $4$  заданного количества воды  $W$  (по указанию преподавателя)
6. Замерить мерной иглой  $b$  уровень воды в верхнем бьефе
7. Вентилем  $3$  изменить расход потока (по указанию преподавателя) и повторить опыт по пп. 4 и 5
8. Обработать опытные данные в соответствии с формой отчетного журнала.

#### 5. Форма отчетного журнала

##### Лабораторная работа №4

#### Определение расхода открытого потока.

#### Тарировка мерного водослива.

1. Схема лабораторной установки.
2. Эскиз мерного водослива с тонкой стенкой
3. Регистрация опытных данных.

3.1. Отметка гребня водослива  $z_{г.в.} =$  см

Измеряемые в опытах величины (табл.1)

Таблица 1

№ Пп	Измеряемая величина	Ед. изм.	Опыт					
			1	2	3	4	5	6
3.2	Объем воды	см <sup>3</sup>						
3.3	Время прохождения	с						
3.4	Отметка уровня воды в верхнем бьефе	см						

4. Обработка опытных данных (табл.2)

Таблица 2

№ Пп	Вычисляемая Величина	Ед изм	Формула	Опыт					
				1	2	3	4	5	6
4.1	Расход потока	см <sup>3</sup> /с	$Q = W / t$						
4.2	Напор водослива	с	$H = z_{г.б} - z_{г.в}$						
4.3	Коэффициент расхода	-	$m = \frac{Q}{M}$						
4.4	Постоянная водослива	-	$M =$						

5. Среднее значение коэффициента расхода водослива  $m_{cp} =$

6. Среднее значение постоянной мерного водослива  $M_{cp} =$

7. Определение параметров аналитического уравнения  $Q = aH^b$  тарировочной кривой методом «наименьших квадратов»



## 7.1. Обработка результатов опыта

Таблица 3

Величина	Номера опытов						Суммы
	1	2	3	4	5	6	
$Q, \text{см}^3 / \text{с}$							-
$Y_{on} = \lg Q$							$K_I =$
$H, \text{см}$							-
$X_{on} = \lg H$							$K_{II} =$
$X_{on}^2$							$K_{III} =$
$X_{on} \cdot Y_{on}$							$K_{IV} =$

## 7.2. Расчетная система уравнений

$$\left. \begin{aligned} 6 \cdot A + K_{II} \cdot B &= K_I \\ K_{II} \cdot A + K_{III} \cdot B &= K_{IV} \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

## 7.3. Результаты решения системы уравнений

$$A = \quad ; B =$$

## 7.4. Параметры уравнения тарировочной кривой

$$a = 10^A = \quad ; b = B =$$

## 7.5. Уравнение опытной тарировочной кривой

$$Q = H$$

## 8. Опытные точки и тарировочная кривая исследованного водослива

Подпись студента \_\_\_\_\_

" \_\_ " \_\_\_\_\_ 20 \_\_ г.

Работу принял \_\_\_\_\_

**6. Контрольные вопросы**

Схема и расчетные формулы определения расхода открытого потока жидкости с помощью элементарных расходов и с помощью изотак

Схема и принцип измерения расхода с помощью динамометров

Схема, принцип работы и расчетная формула для определения расхода измерительными лотками Вентури, лотками Вентури с порогом, Паршала и САНИИРИ.

Схема, принцип работы и расчетная формула для определения расхода мерными водосливами треугольной, прямоугольной, трапециевидной и параболической форм

Схема, принцип работы и расчетная формула для определения расхода водомерным щитом Игнатова.

Правило установки мерных водосливов

Правила построения и пользования тарировочной кривой измерительных лотков и мерных водосливов.

## 5. ОПЫТНАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ И ГАЗА.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

#### Режимы течения жидкости или газа.

#### Определение критического числа Рейнольдса в цилиндрической трубе.

##### 1. Цель и задачи работы

1. Демонстрация ламинарного режима течения.
2. Демонстрация турбулентного режима течения.
3. Определение критического числа Рейнольдса для потока жидкости в цилиндрической трубе.

##### 2. Основы теории

В потоке жидкости или газа возможен один из двух режимов движения отдельных их частиц.

1. Частицы движутся по траекториям, параллельным друг другу, оси потока и стенкам, ограждающим поток (рис.72).

2. Частицы движутся хаотично, по взаимно пересекающимся траекториям, на первый взгляд, совершенно неупорядоченно, хотя основное направление их движения совпадает с направлением их потока (рис.73).

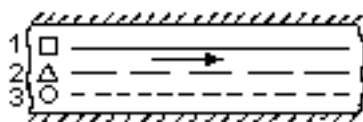


Рисунок 72

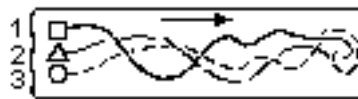


Рисунок 73

Первый называется *ламинарным* (от латинского *lamina*-пластинка, слой) - упорядоченное течение, при котором жидкость или газ перемещается как бы слоями, параллельными направлению течения.

При ламинарном режиме возникающее случайное возмущение имеет малую мощность из-за малых скоростей движения частиц и гасится силами, вызываемыми вязкостью жидкости (случайно возникающие вихри сносятся течением и затухают). Эпюра скоростей по сечению потока имеет ярко выраженный неравномерный характер с увеличением скорости движения частиц  $u$  по мере удаления  $y$  от стенки ограничивающей поток (рис.74). Эпюра скоростей в цилиндрической трубе имеет параболический характер, а потери напора пропорциональны скорости в первой степени (линейная область сопротивления).

Второй режим называется *турбулентным* (от латинского *turbulentus*- беспорядочный, хаотичный) - неупорядоченное течение жидкости или газа, при котором происходит перемешивание слоев друг с другом, в результате чего частицы перемещаются не только в продольном, но и в поперечном к потоку направлениях.

Так называемая турбулентность образуется вследствие возникновения у стенок потока и внутри него возмущений в виде вихрей, которые при больших скоростях движения частиц не могут гаситься силами вязкости и поэтому не затухают.

Причины образования вихрей многочисленны, но главной из них является разность скоростей движения различных точек одной частицы (рис.75), приводящая к вращательному движению последней. Это обстоятельство особенно сильно проявляется вблизи ограждающих стенок, где градиент скорости наибольший, а неровности поверхности (шероховатость) способствуют образованию вихрей, интенсивность и момент возникновения которых носят случайный, многофакторный характер. Образование вихрей приводит кроме поступательного движения частицы, еще и к вращательному движению, сложение которых возбуждает силу  $P$ , приложенную к массе частицы и направленную нормально к продольной скорости потока (так называемый эффект Магнуса).

Накладываясь друг на друга, зачастую увеличивая свою интенсивность, вихри и сила  $P$  вызывают усиленное и хаотичное перемешивание частиц жидкости или газа внутри потока. Все эти явления происходят тем интенсивнее и хаотичнее (с большой турбулентностью), чем больше скорость потока.

Процесс хаотичного перемешивания обуславливает возникновение пульсации скорости, т.е. такое изменение ее величины в данной точке, при котором отклонения от некоторого среднего значения по величине и направлению происходит хаотично, и в обе стороны. Пульсационные изменения испытывает также давление в данной точке (*пульсация давления*), а в сжимаемой жидкости (газе) и плотность. В турбулентном потоке скорости продольного движения  $u$  частиц жидкости или газа в пределах сечения распределены довольно равномерно (рис.76) из-за обмена количеством движения отдельных частиц.

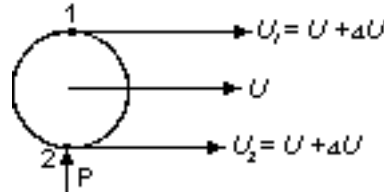


Рисунок 74

Рисунок 75

Рисунок 76

При турбулентном режиме течения отдельные частицы жидкости или газа за счет хаотических отклонений от направления потока совершают фактически более продолжительный путь; движение сопровождается постоянными столкновениями отдельных частиц. Это и объясняет значительные потери энергии потока на преодоление сил сопротивления, движению (потери энергии пропорциональны скорости в степени, близкой или равной двум).

Существование двух режимов течения было установлено на рубеже XVIII и XIX вв., но первые исследования их относятся к 1839 г (немецкий гидромеханик Г.Гаген) и к 1841 г. (французский физик Ж.Пуазейль). Последующие исследования показали, что ламинарный режим течения практически возможен при движении или очень вязких жидкостей (нефть, битум, мазут и т.п.), или в трубах малого поперечного сечения (в капиллярных трубках, в зернистых породах при движении в них грунтовых вод), или при очень малых скоростях движения частиц. Во всех остальных случаях в течении жидкости или газа наблюдается турбулентный режим.

Английский ученый О.Рейнольдс, изучая вопросы смены режимов течения, установил в 1883 г., что переход течения жидкости или газа из ламинарного режима в турбулентный при увеличении скорости потока происходит в результате потери устойчивости ламинарного течения, которая наступает внезапно, когда скорость потока достигает некоторого критического значения  $V_{кр}$ , зависящего от характерного размера поперечного сечения потока  $L$ , плотности  $\rho$  и вязкости  $\mu$  жидкости или газа:

$$V_{кр} = B \frac{\mu}{\rho L} \quad (108)$$

где  $B$  - безразмерный коэффициент пропорциональности, названный впоследствии *критическим числом Рейнольдса*  $Re_{кр}$ .

Восстановление ламинарного режима при уменьшении скорости турбулентного потока также происходит внезапно, когда скорость потока снизится до критического значения  $V_{кр}$ , определяемого по формуле (108).

Исследованиями О.Рейнольдса было установлено, что безразмерный коэффициент пропорциональности при переходе турбулентного режима в ламинарный имеет следующие значения;

- если  $L = R$  (гидравлический радиус),

$$Re_{kp} = \frac{V_{kp} R}{\nu} = 580, \quad (109)$$

- если  $L = d$  (диаметр цилиндрической напорной трубы),

$$Re_{kp} = \frac{V_{kp} R}{\nu} = 2320, \quad (110)$$

т.е.  $Re_{kp}$  не зависит ни от типа жидкости или газа, ни от размеров поперечного сечения потока.

При переходе режима течения из ламинарного в турбулентный можно увеличить критическую скорость  $V_{kp}$  их смены (увеличить  $Re_{kp}$ ), если искусственно устранять возможные источники возникновения возмущения (плавный вход в трубу, предельно минимальная шероховатость, исключение случайных ударов о трубу, плавное увеличение скорости и т.п.). Удавалось получать смену режимов течения при  $Re_{kp} \approx 20000$ . Но ламинарный режим в этих случаях является неустойчивым; чтобы он перешел в турбулентный достаточно самого малого возмущения. Следовательно, если вычислить *число Рейнольдса* при фактической скорости потока  $V$

$$Re = \frac{V d}{\nu} \quad \text{или} \quad Re = \frac{V R}{\nu} \quad (111)$$

и сравнить его с критическим значением, то можно установить режим течения жидкости или газа: -при  $Re < Re_{kp}$  - режим ламинарный;

-при  $Re > Re_{kp}$  - режим турбулентный.

### 3. Объекты и средства исследования

В состав опытной установки (рис.77) входят бак 1, наполненный водой, присоединенная в нижней части бака стеклянная труба 2 с плавным входом и размещенный над баком 1 бачок 3, наполненный окрашенной жидкостью с плотностью, близкой к плотности жидкости в баке 1. От бачка 3 отходит тонкая трубка 4, входящая в трубу 2. Труба 2 и трубка 4 снабжены для регулирования расхода жидкости и краски кранами 5 и 6. Исследуемая жидкость из трубы 2 сливается во время опыта в мерный сосуд 7. Температура воды измеряется термометром 8. Количество подаваемой в бак 1 воды регулируется краном 9.

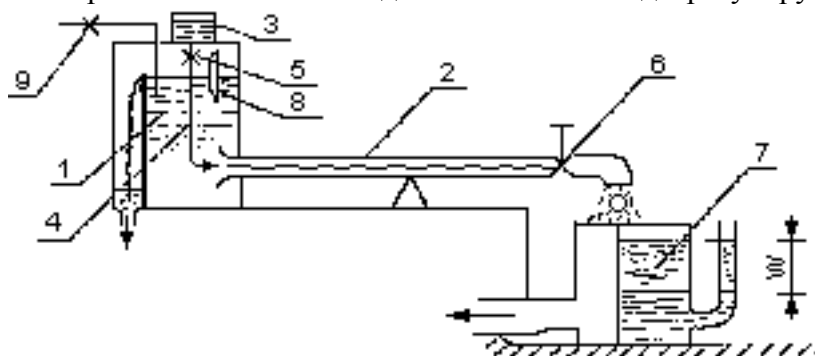


Рисунок 77

### 4. Подготовка к работе и программа работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Регулируя подачу воды краном 9, добиться постоянства уровня воды в баке 1 со слабым переливом.
3. Открыв кран 5, подать струйку подкрашенной жидкости внутрь стеклянной трубы 2.
4. Медленно открывая кран 6, визуально установить в трубе 2 ламинарный режим течения (подкрашенная струйка не перемешивается с остальной массой воды в трубе).
5. Провести первый опыт, выполняя замеры в соответствии с формой отчетного журнала.
6. Открыть полностью кран 6 и визуально наблюдать за турбулентным режимом

течения (неокрашенная струйка полностью перемешивается со всей массой воды в трубе).

7. Провести второй опыт.

8. Медленно прикрыть кран 6 до тех пор, пока турбулентный режим не перейдет в ламинарный (добиться критического состояния).

9. Провести третий опыт.

10. Выполнить вычисления в соответствии с формой отчетного журнала.

### 5. Форма отчетного журнала

#### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

### Определение критического числа Рейнольдса в цилиндрической трубе.

1. Схема лабораторной установки.

2. Регистрация опытных данных

2.1. Диаметр трубы  $d =$  см.

Измеряемые в опытах величины

Таблица 1

№ п/п	Измеряемая величина	Ед. изм.	Опыт		
			1	2	3
2.2	Температура воды $T$	град			
2.3.	Объем воды поступающий в мерный сосуд, $W$	$см^3$			
2.4.	Время наполнения объема, $t$	$с$			
2.5.	Характер режима течения	-			

3.Обработка результатов опыта

3.1. Площадь сечения трубы  $\omega = \frac{\pi d^2}{4} =$   $см^2$

Таблица 2

№ п/п	Измеряемая Величина	Формула	Ед. изм.	Опыт		
				1	2	3
3.2	Расход потока	$Q = \frac{W}{t}$	$см^3 / с$			
3.3	Кинематический коэф- фициент вязкости		$см^2 / с$			
3.4	Средняя скорость	$V$	$см / с$			
3.5	Число Рейнольдса	$Re = \frac{Vd}{\nu}$	-			

Подпись студента \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Работу принял \_\_\_\_\_

### 6. Контрольные вопросы

1. Признаки и условия существования ламинарного режима течения жидкости и газа.

2. Признаки и условия существования турбулентного режима течения жидкости и газа.

3. Пульсация скорости и давления.

4. Формула и численные значения критического числа Рейнольдса для напорных и безнапорных потоков

5. Формула числа Рейнольдса.

6. Определение режима течения по числу Рейнольдса.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

### Уравнение Д.Бернулли.

### Построение напорной и пьезометрической линий.

#### 1. Цель и задачи работы

1. Определение пьезометрических напоров в различных сечениях потока реальной жидкости.
2. Определение гидродинамических напоров в различных сечениях потока.
3. Построение пьезометрической и напорной линий по полученным в опытах результатам.

#### 2. Основы теории

Уравнение Д.Бернулли (1738 г.) является основным уравнением гидроаэродинамики, связывающим между собой величины давления и скорости в разных точках движущейся жидкости или газа (при разных вертикальных координатах - аппликатах). Оно показывает, что изменение одной из этих величин (аппликаты, скорости или давления) обязательно приведет к изменению, по крайней мере, еще одной (увеличение скорости может привести к уменьшению давления, уменьшение аппликаты может привести к увеличению давления и т.п.).

Уравнение Д.Бернулли широко применяется при исследовании различных теоретических вопросов механики жидкости и газа и решении практических задач, связанных с движением жидкости или газа. В соответствии с типом решаемой задачи его представляют в одной из трех видов: в энергетической форме, в форме напора (гидравлической или геометрической) или в форме давлений.

В зависимости от вида изучаемой жидкости или газа различают уравнения для несжимаемой жидкости или для сжимаемой жидкости (газа), в зависимости от учета гидравлических сопротивлений - для реальной или идеальной жидкости (или газа); в зависимости от массы движущейся жидкости или газа - для элементарной струйки или для целого потока.

При использовании уравнения Бернулли необходимо учитывать, что оно справедливо только при установившемся течении под действием только одной массовой силы - силы тяжести. Для целого потока жидкости его нужно применять в тех живых сечениях, движение жидкости или газа около которых прямолинейное или, в крайнем случае, плавно изменяющееся (в этом случае живое сечение плоское и давление в нем определяется по закону гидростатики (рис.78, а)).

При использовании уравнения Бернулли для реальной жидкости левая часть уравнения должна относиться к сечению, расположенному выше по течению, а правая - ниже по течению.

##### 2.1. Уравнение Бернулли в энергетической форме

Уравнение Бернулли в энергетической форме записывается в следующем виде (например, для целого потока реальной несжимаемой жидкости)

$$gz_1 + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2} = gz_2 + \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2} + \Delta e_{1-2}, \quad (112)$$

$V$  - средняя скорость потока в сечении;

$\rho$  - плотность жидкости;

$g$  - ускорение свободного падения;

$\alpha$  - коэффициент Кориолиса (1836 г.) или *корректив кинетической энергии* (отношение истинной кинетической энергии потока к кинетической энергии, вычисленной по средней скорости); зависит от формы эпюры скоростей.

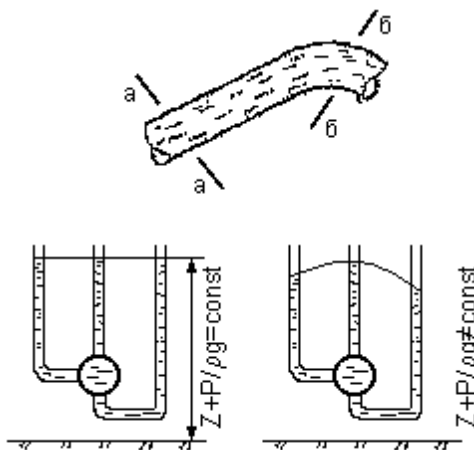


Рисунок 78

Каждый из членов уравнения (112) имеет размерность квадрата скорости (длина/время)<sup>2</sup> и представляет собой часть *удельной механической энергии* (энергии единицы массы жидкости или газа):

$gz$  - *удельная потенциальная энергия положения*;

$P/\rho$  - *удельная потенциальная энергия давления*;

$gz + P/\rho$  - *общий запас удельной потенциальной энергии*;

$\frac{\alpha_1 V_1^2}{2}$  - *удельная кинетическая энергия*;

$gz_1 + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2}$  - *удельная механическая энергия потока* в сечении

$\Delta e_{1-2}$  - *потери удельной энергии* при движении жидкости или газа (условное понятие, так как существует только превращение одного вида энергии в другой, в данном случае механическая энергия безвозвратно переходит в тепловую).

С физической точки зрения равенство Бернулли гласит, что удельная механическая энергия потока реальной жидкости или газа является величиной, убывающей по направлению движения.

Уравнение Бернулли является частным случаем всеобщего закона сохранения энергии и массы в природе, сформулированного впервые М.В. Ломоносовым в 1748 г. и обобщенного в трудах А.Лавуазье в 1789 г. Уравнение Бернулли в энергетической форме (112) не только подтверждает возможность превращения в потоке жидкости или газа потенциальной энергии в кинетическую или наоборот, но и показывает количественные соотношения этих превращений.

## 2.2. Уравнение Бернулли в форме напоров

Уравнение (1) в форме напоров представляется в следующем виде:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{n_{1-2}}, \quad (113)$$

где каждый член имеет линейную размерность (длина) и может быть представлен в виде вертикального отрезка (высоты или напора):

$z$  - *геометрическая* (геодезическая) *высота* (отметка, отсчитываемая от единой горизонтальной плоскости 0-0 — *плоскости сравнения или плоскости отсчета*)





преодоление сопротивлению всегда увеличивается. Поэтому кривая Е-Е будет нисходящей линией. Падение ее на единице длины потока (отрицательный градиент) называется *гидравлическим уклоном*:

$$i = -\frac{d}{dl} \left( z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g} \right) = -\frac{dh_n}{dl} = -\frac{dH}{dl}, \quad (114)$$

(знак "-" принят для того, чтобы гидравлический уклон был всегда положительным).

Среднее значение гидравлического уклона между двумя сечениями

$$i_{1-2} = \frac{\left( z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left( z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right)}{l_{1-2}}, \quad (115)$$

Кривая П-П, соединяющая вершины сумм двух вертикальных отрезков  $Z$  и  $\frac{P}{\rho g}$ , называется *пьезометрической линией*, т.е. это линия, которая графически изображает характер изменения величины пьезометрического напора  $H_n$  по направлению движения жидкости или газа.

Пьезометрическая линия может понижаться либо повышаться, что зависит от размеров сечения потока. На участках с постоянным сечением пьезометрическая линия понижается параллельно напорной линии. На участках с переменным сечением напорная и пьезометрическая линии не параллельны друг другу, т.к. изменяется величина скоростного напора  $\frac{\alpha V^2}{2g}$ , при этом при увеличении сечения пьезометрический напор может и возрастать.

Изменение пьезометрического напора на единице длины потока (отрицательный градиент) называется *пьезометрическим уклоном*:

$$i_n = -\frac{d}{dl} \left( z + \frac{P}{\rho g} \right) = -\frac{dH_n}{dl}, \quad (116)$$

Среднее значение пьезометрического уклона между двумя сечениями

$$i_{n1-2} = \frac{\left( z_1 + \frac{P_1}{\rho g} \right) - \left( z_2 + \frac{P_2}{\rho g} \right)}{l_{1-2}}, \quad (117)$$

Поскольку пьезометрическая линия может понижаться или повышаться, то пьезометрический уклон соответственно может быть либо положительным (пьезометрический напор вдоль потока уменьшается), либо отрицательным (пьезометрический напор вдоль потока увеличивается).

При равномерном движении, т.е. когда средняя скорость на рассматриваемом участке во всех сечениях одинакова, напорная и пьезометрическая линии представляют собой взаимно параллельные прямые, т.е. гидравлический и пьезометрический уклоны одинаковые ( $i = i_n$ ).

### 2.3. Уравнение Бернулли в форме давлений

Уравнение (112) в форме давлений записывается в следующем виде

$$\rho_1 g z_1 + P_1 + \rho_1 \alpha \frac{V_1^2}{2} = \rho_2 g z_2 + P_2 + \rho_2 \alpha \frac{V_2^2}{2} + \Delta p_{n1-2}, \quad (118)$$

где все члены имеют размерность давления (сила/площадь):

$\rho g z$  - гравитационное давление;

$P$  - статическое давление;

$\rho \alpha \frac{V_1^2}{2}$  - динамическое давление;

$\Delta p_{n_{1-2}}$  - потери давления при движении жидкости или газа на преодоление сил сопротивления.

В уравнении (118) все члены могут быть представлены как соответствующая часть удельной механической энергии жидкости или газа, отнесенная к единице ее объема. Их тоже называют удельными энергиями, но подразумевают, что в данном случае понятие "удельная" означает энергию массы жидкости или газа, находящейся в единице объема (ср. с пп. 2.1 и 2.2).

#### 2.4. Другие виды записей уравнения Бернулли

В зависимости от конкретных условий решения задачи движения жидкости или газа отдельные члены уравнения могут играть или решающую, или ничтожно малую (тогда ими можно пренебречь) роль. В этом случае возникают более простые виды записей уравнений (112), (113) или (118).

Для элементарной струйки (для потока сравнительно малых поперечных размеров)

$$gz_1 + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{u_1^2}{2} = gz_2 + \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{u_2^2}{2} + \Delta e_{1-2}, \quad (119a)$$

$$z_1 + \frac{P_1}{g\rho_1} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{g\rho_2} + \frac{u_2^2}{2g} + h_{n_{1-2}}, \quad (119б)$$

$$\rho_1 g z_1 + P_1 + \rho_1 \frac{u_1^2}{2} = \rho_2 g z_2 + P_2 + \rho_2 \frac{u_2^2}{2} + \Delta p_{n_{1-2}}, \quad (119в)$$

где  $u$  - скорость движения жидкости или газа в данной точке.

Для адиабатического течения газа (без теплообмена с окружающей средой)

$$\frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{u_1^2}{2} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{u_2^2}{2} + \Delta e_{1-2}, \quad (120)$$

где  $\kappa$  - показатель адиабаты процесса течения

$$\text{или} \quad \frac{\kappa}{\kappa-1} R T_1 + \frac{u_1^2}{2} = \frac{\kappa}{\kappa-1} R T_2 + \frac{u_2^2}{2} + \Delta e_{1-2}, \quad (121)$$

где

$R$  - газовая постоянная;

$T$  - абсолютная температура.

Иногда уравнение в виде (121) называют уравнением Бернулли в форме температур.

Для идеальной жидкости или газа

$$\Delta e_{1-2} = h_{n_{1-2}} = \Delta P_{1-2} = 0,$$

т.е. для идеальной (другое название - невязкой) жидкости или газа отсутствуют потери энергии (напора или давления).

### 3. Объекты и средства исследований

Опытная установка состоит из трубопровода 1 переменного сечения, который соединяет напорный 2 и сливной 3 бачки (рис.80).

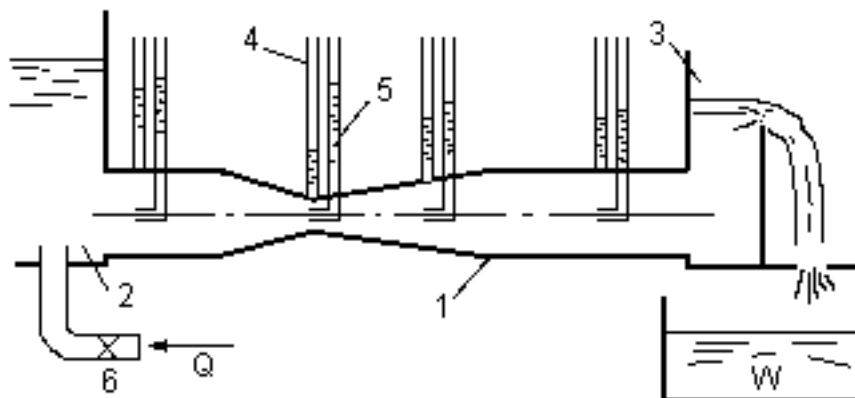


Рисунок 80

В характерных сечениях трубопровода установлены пьезометры 4 для определения в этих сечениях пьезометрического напора  $z + \frac{P}{\rho g}$ . Рядом с пьезометрами установлены гидродинамические трубки Пито 5, представляющие собой трубки с загнутым носиком навстречу течению (см. лаб. раб. №2). В таких трубках уровень жидкости поднимается на высоту  $z + \frac{P}{\rho g} + \frac{u^2}{2g}$ , где  $u$  - значение местной скорости в точке рассматриваемого сечения (в опыте - на оси трубы).

При движении жидкости в трубе наглядно видны уровни, образующиеся в пьезометрических и гидродинамических трубках, что позволяет оценить изменение пьезометрического напора потока и гидродинамического напора осевой струйки в различных сечениях трубы.

### 4. Подготовка к работе и программа работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Установить постоянство начального напора  $H$ , что достигается путем регулирования поступления воды в напорный бачок с помощью крана 6 и обеспечением бесперебойной работы сливного бачка.

3. По показаниям пьезометров измерить величину  $H_n = z + \frac{P}{\rho g}$ .

4. По показаниям гидродинамических трубок измерить величину напора осевой струйки  $H_{oc} = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{u^2}{2g}$ .

5. Измерить время  $t$  наполнения мерной емкости  $W$ .
6. Произвести расчет измеренных величин согласно последовательности, изложенной в отчетном журнале.
7. Построить пьезометрическую и напорную линии потока воды в трубе и напорную линию осевой струйки.

**5. Форма отчетного журнала**  
**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6**  
**Уравнение Д.Бернулли.**  
**Построение напорной и пьезометрической**  
**линий.**

1. Схема опытной установки.
  2. Регистрация опытных данных.
  - 2.1. Объем воды поступивший в мерный сосуд  $W = \quad \text{см}^3$ .
  - 2.2. Время наполнения объема  $t = \quad \text{с}$ .
  - 2.3. Уровень воды в напорном бачке  $Z_H = \quad \text{см}$ .
  - 2.4. Уровень вода в сливном бачке  $Z_C = \quad \text{см}$ .
- Измеряемые в опыте величины (таблица 1)

Таблица 1

№ пп	Измеряемая величина	Ед. измер.	Номера сечений						
			1	2	3	4	5	6	7
2.5	Размеры сечения: ширина $b$ высота $h$	см см							
2.6	Показания пьезометров $H_n$	см							
2.7	Показания гидродинамических трубок $H_{oc}$	см							

3. Обработка результатов опыта (таблица 2)

3.1 Расход потока  $Q = \frac{W}{t} = \quad = \quad \text{см}^3/\text{с}$

Таблица 2

№ пп	Вычисляемая величина	Формула	Ед. изм.	Номера сечений						
				1	2	3	4	5	6	7
3.2	Площади живых сечений	$\omega = bh$	см <sup>2</sup>							
3.3	Средние скорости	$V = \frac{Q}{\omega}$	см/с							
3.4	Скоростные напоры: а) потока по средн. скорости	$\frac{V^2}{2g}$	см							
	б) осевой струйки	$\frac{u^2}{2g} = H_{oc} - H_n$	см							
3.5	Полные напоры потока в сечениях	$H = H_n + \frac{V^2}{2g}$	см							
3.6	Потери напора до сечений	$h_n = z_H - H$	см							

4. Напорная и пьезометрическая линии потока и напорная линия осевой струйки (рисунок).

Подпись студента \_\_\_\_\_  
 Работу принял \_\_\_\_\_

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## 6. Контрольные вопросы

1. Условия применимости уравнения Бернулли.
2. Запись уравнения Бернулли в энергетической форме и смысл каждого его члена для элементарной струйки, идеальной жидкости, элементарной струйки реальной жидкости, целого потока реальной жидкости, адиабатического течения газа.
3. Запись уравнения Бернулли в форме давлений для элементарной струйки и потока идеальных жидкости или газа и реальных жидкости или газа и смысл каждого его члена.
4. Запись уравнения Бернулли в форме напоров и смысл каждого его члена для элементарной струйки идеальной жидкости, элементарной струйки реальной жидкости, целого потока реальной жидкости, адиабатического течения газа.
5. Формула для вычисления удельных потенциальной и кинематической энергии, потерь энергии, пьезометрического и скоростного напоров, потерь напора, гравитационного давления, динамического давления.
6. Взаимосвязь между соответствующими членами уравнения Бернулли, записанного в разных формах.
7. Понятие гидравлического и пьезометрического уклонов и формулы для их вычисления.
8. Энергетический смысл уравнений Бернулли записанных в форме напоров и давлений.
9. Оценка взаимного положения или очертания напорной и пьезометрической линий на предложенной схеме участка потока.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1.ЗАКОНЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ И ПРАВИЛА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ.....	5
1.1 Виды подобия потоков.....	5
1.2 Основной закон подобия потоков (закон Ньютона).....	6
1.3 Частные критерии подобия потоков.....	6
1.4. Основные правила моделирования потоков.....	8
1.5.Пересчет данных опыта на данные натуры.....	9
2.ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ОПРЕДЕЛЕННЫХ ВЕЛИЧИН	11
2.1 Виды ошибок измерения.....	11
2.2 Оценка точности измерений по приборам.....	12
2.3 Оценка точности экспериментально определенной функции.....	14
3.ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	17
3.1.Графическое изображение результатов эксперимента.....	17
3.2 Подбор эмпирических формул.....	17
4.ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ИХ ПОТОКОВ .....	24
 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 Измерение давления в жидкости и газе.....	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 Измерение местных скоростей в потоке жидкости или газа.....	41
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 Определение расхода напорного потока жидкости или газа. Тарировка водомера сужающего типа.....	50
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 Определение расхода открытого потока. Тарировка мерного водослива.....	59
5.ОПЫТНАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ И ГАЗА.....	66
 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 Режимы течения жидкости или газа. Определение критического числа Рейнольдса в цилиндрической трубе.....	66
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 Уравнение Д.Бернулли. Построение напорной и пьезометрической линий.....	70
ОГЛАВЛЕНИЕ .....	78