

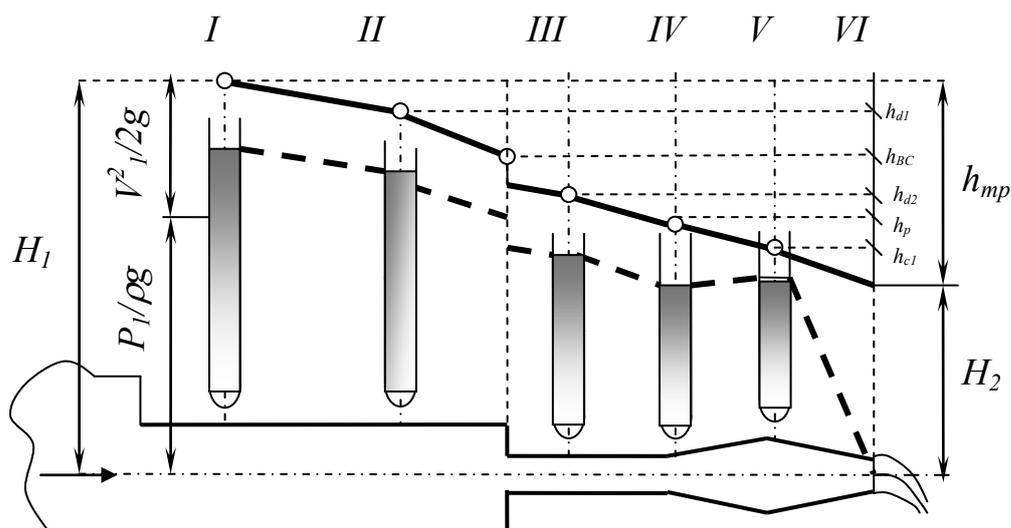
ФГБОУ ВПО «БРЯНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра сельскохозяйственных, мелиоративных и строительных машин

**РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ С МЕТОДИЧЕСКИМИ УКАЗАНИЯМИ  
к выполнению лабораторных работ по гидравлике  
с применением портативной лаборатории «КАПЕЛЬКА»**

Разработана для студентов, обучающихся  
по направлению подготовки бакалавриата  
110800 - Агроинженерия



Брянск 2014

УДК 532(075.8)  
ББК 30.123  
К 89

Кузнецов, В.В. Рабочая тетрадь с методическими указаниями к выполнению лабораторных работ по гидравлике с применением портативной лаборатории «КАПЕЛЬКА» / В.В. Кузнецов, В.К. Спиридонов, Л.А. Паршикова, А.М. Случевский – Брянск. Издательство Брянской ГСХА, 2014. – 32 с.

Рабочая тетрадь с методическими указаниями к выполнению лабораторных работ по гидравлике с применением портативной лаборатории «КАПЕЛЬКА» разработана для бакалавров.

Рецензент: д.т.н. Купреенко А.И.

Рекомендовано к изданию методической комиссией инженерно-технологического факультета Брянской государственной сельскохозяйственной академии, протокол №2 от 12.12.13 г.

© В.В. Кузнецов, 2014  
© В.К. Спиридонов, 2014  
© Л.А. Паршикова, 2014  
© А.М. Случевский, 2014  
© Брянская ГСХА, 2014

**ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ГИДРАВЛИКЕ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОРТАТИВНОЙ ЛАБОРАТОРИИ «КАПЕЛЬКА»**

В основе теоретических методов механики жидкостей лежит эксперимент. Результаты приближенных теоретических решений должны проверяться экспериментальными исследованиями, которые позволяют уточнить полученные закономерности и получить коэффициенты, делающие их пригодными для точных технических расчетов. Значение эксперимента в гидравлике особенно велико, поскольку ряд практических задач не поддается теоретической схематизации и решается только опытным путем, например, определение потерь напора во многих местных сопротивлениях. Таким образом, целесообразное сочетание теории и эксперимента является в гидравлике основным методом исследования.

Портативная лаборатория «Капелька» помогает студентам практически изучить основные теоретические разделы курса гидравлики, понять физическую сущность происходящих процессов и определить важнейшие факторы, влияющие на движение жидкости в трубах, в местных сопротивлениях и т. д. При этом «Капелька» обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогами: не имеет двигателей, насосов, вентилях; не требует подвода воды и электроэнергии, удобна для лекционных демонстраций.

В состав настоящих методически указаний входят 8 лабораторных работ:

- Работа 1. Изучение физических свойств жидкости;
- Работа 2. Изучение приборов для измерения давления;
- Работа 3. Измерение гидростатического давления;
- Работа 4. Изучение структуры потоков жидкости;
- Работа 5. Определение режима движения жидкости;
- Работа 6. Иллюстрация уравнения Бернулли;
- Работа 7. Определение местных потерь напора;
- Работа 8. Определение потерь напора по длине

Ко всем лабораторным работам предъявляются следующие общие требования:

1. Перед тем, как приступить к работе, студент должен ознакомиться:
  - с основными понятиями и формулами, касающимися данной лабораторной работы,
  - с описанием устройств и порядком проведения работы;
  - с таблицами используемых и экспериментальных величин.
2. Выполнить лабораторную работу и оформить отчет.
3. Сдать оформленную работу и ответить на вопросы преподавателя, касающиеся теории.

Студенты, не выполнившие лабораторные работы, к экзамену не допускаются.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

### **Основной**

1. Косой В.Д. Пособие для лабораторных и практических занятий по курсу «Гидравлика»: Учебное пособие.– М.: ДеЛи, 2007
2. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 2005. – 640с.: ил.
3. Г.Д. Слабожанин, Д.Г. Слабожанин. Практикум по гидравлике на портативной лаборатории «Капелька». – Томский архитектурно-строительный университет, 2007

### **Дополнительный**

1. Артемьева Т.В., Лысенко Т.М., Румянцева А.Н., Стесин С.П. Гидравлика, гидромашины и гидропривод: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. – 3-е изд., стер. – М: Издательский центр «Академия», 2007. – 336с.
2. Калицун В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация. Учебное пособие.- М.: , 2003
3. Штеренлихт Д.В., Алышев В.М., Яковлева Л.В. Гидравлические расчеты: Учебное пособие. - М.: Колос, 1992. – 287с.: ил.

## РАБОТА 1. ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ

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

**Приборы, устройства и материалы:** Устройство №1 включает в себя 5 приборов, выполненных в общем прозрачном корпусе: 1 – термометр, 2 – ареометр, 3 – вискозиметр Стокса, 4 – капиллярный вискозиметр, 5 – сталагмометр (рис. 1)

### Теория и основные положения

*Жидкостью* называют малосжимаемое тело, изменяющее свою форму под действием весьма малых сил. Основные характеристики жидкости - плотность, сжимаемость, температурное расширение, вязкость и поверхностное натяжение.

*Плотность  $\rho$*  - отношение массы  $m$  жидкости к её объему  $W$ :

$$\rho = m/W, [кг/м^3].$$

*Сжимаемость* - свойство жидкости уменьшать объем под действием давления. Сжимаемость оценивается *коэффициентом объемного сжатия  $\beta_c$* , показывающим относительное уменьшение объема жидкости  $W$  при повышении давления  $p$  на единицу:

$$\beta_c = (\Delta W/W) / \Delta p, [м^2/Н].$$

*Температурное расширение* - свойство жидкости изменять объем при нагревании - характеризуется *коэффициентом температурного расширения  $\beta_m$* , равным относительному приращению объема  $W$  с изменением температуры  $T$  на один градус при постоянном давлении:

$$\beta_m = (\Delta W/W) / \Delta T, [1/^\circ C].$$

Как правило, при нагревании объем жидкости увеличивается.

*Вязкость* - свойство жидкости сопротивляться относительному скольжению ее слоев. Вязкость оценивают *динамическим коэффициентом вязкости  $\mu$  [Па с]*, который равен касательному напряжению между соседними слоями, если их относительная скорость перемещения численно совпадает с толщиной слоя. *Кинематический коэффициент вязкости  $\nu$*  определяют из формулы:

$$\nu = \mu / \rho [м^2/с].$$

Оба коэффициента определяются видом жидкости, не зависят от скорости течения, существенно уменьшаются с возрастанием температуры.

*Поверхностное натяжение* - свойство жидкости образовывать поверхностный слой взаимно притягивающихся молекул. *Поверхностное натяжение* характеризуется *коэффициентом поверхностного натяжения  $\sigma$* , равным силе на единице длины контура свободной поверхности. Значения  $\rho$ ,  $\beta_c$ ,  $\beta_m$ ,  $\nu$ ,  $\sigma$  при 20 °С указаны в таблице 1.

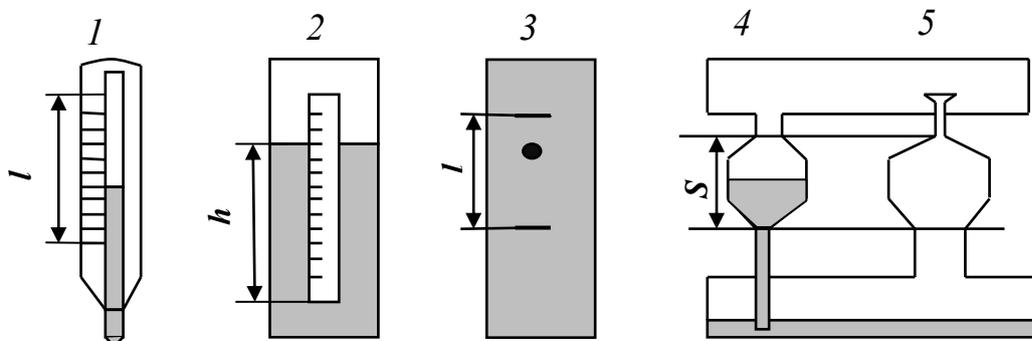
Таблица 1 - Значения  $\rho$ ,  $\beta_c$ ,  $\beta_m$ ,  $\nu$ ,  $\sigma$  при 20 °С

Жидкость	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\beta_c 10^3$ , МПа <sup>-1</sup>	$\beta_m 10^3$ , °С <sup>-1</sup>	$\nu 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\sigma 10^3$ , Н/м
Вода пресная	998	0,49	0,15	1,01	73
Спирт этиловый	790	0,78	1,10	1,52	23
Масло:					
моторное М-10	900	0,60	0,64	800	25
индустриальное 20	900	0,72	0,73	110	25
трансформаторное	890	0,60	0,70	30	25
АГМ-10	850	0,76	0,83	20	25

## Порядок выполнения работы и методика измерений

### Определение коэффициента температурного расширения жидкости

Термометр 1 имеет стеклянный баллон с капилляром, заполненные термометрической жидкостью, и шкалу. Принцип его действия основан на тепловом расширении жидкостей. Варьирование температуры окружающей среды приводит к соответствующему изменению объема термометрической жидкости и ее уровня в капилляре. Уровень указывает на шкале значение температуры.



1 - термометр; 2 - ареометр; 3 - вискозиметр Стокса;  
4 - капиллярный вискозиметр; 5 - сталагмометр

Рисунок 1 - Схема устройства № 1

Коэффициент температурного расширения термометрической жидкости определяется в следующем порядке на основе мысленного эксперимента (т.е. предполагается, что температура окружающей среды повысилась от нижнего (нулевого) до верхнего предельных значений термометра и уровень жидкости в капилляре возрос на величину  $l$ ):

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

2. Вычислить приращение объема термометрической жидкости  $\Delta W = \pi r^2 l$ , где  $r$  - радиус капилляра термометра.

3. С учетом начального (при  $0^\circ\text{C}$ ) объема термометрической жидкости  $W$  найти значение коэффициента теплового расширения  $\beta_m = (\Delta W/W) / \Delta T$  и сравнить его со справочным значением  $\beta_m^*$  (табл. 1). Значения используемых величин занести в таблицу 2.

Таблица 2 - Таблица измеренных и вычисленных данных

№ опыта	Вид жидкости	$r$ , см	$W$ , см <sup>3</sup>	$\Delta T$ , °C	$l$ , см	$\Delta W$ , см <sup>3</sup>	$\beta_m$ , °C <sup>-1</sup>	$\beta_m^*$ , °C <sup>-1</sup>
1	Спирт							
2	Спирт							
3	Спирт							

### Измерение плотности жидкости ареометром

Ареометр 2 служит для определения плотности жидкости поплавковым методом. Он представляет собой пустотелый цилиндр с миллиметровой шкалой и грузом в нижней части. Благодаря грузу ареометр плавает в исследуемой жидкости в вертикальном положении. Глубина погружения ареометра является мерой плотности жидкости и считывается со шкалы по верхнему краю мениска жидкости вокруг ареометра. В обычных ареометрах шкала отградуирована сразу по плотности. В ходе работы выполнить следующие операции.

1. Измерить глубину погружения  $h$  ареометра по миллиметровой шкале на нем.

2. Вычислить плотность жидкости по формуле  $\rho = 4m/(\pi d^2 h)$ , где  $m$  и  $d$  - масса и диаметр ареометра. Эта формула получена путем приравнивания силы тяжести ареометра

$G=mg$  и выталкивающей (архимедовой) силы  $P_A=\rho g W$ , где объем погруженной части ареометра  $W=(\pi d^2/4)h$ .

3. Сравнить опытное значение плотности  $\rho$  со справочным значением  $\rho^*$  (см. табл. 1). Значения используемых величин свести в таблицу 3.

**Таблица 3 - Таблица измеренных и вычисленных данных**

№ опыта	Вид жидкости	$m, г$	$d, см$	$h, см$	$\rho, г/см^3$	$\rho^*, г/см^3$
1	Вода					
2	Вода					
3	Вода					

**Определение кинематической вязкости вискозиметром Стокса**

Вискозиметр Стокса 3 достаточно прост, содержит цилиндрическую емкость, заполненную исследуемой жидкостью, и шарик. Прибор позволяет определить вязкость жидкости по времени падения шарика в ней следующим образом.

1. Повернуть устройство № 1 в вертикальной плоскости на  $180^\circ$  и зафиксировать секундомером время  $t$  прохождения шариком расстояния  $l$  между двумя метками в приборе 3. Шарик должен падать по оси емкости без соприкосновения со стенками. Опыт выполнить три раза, а затем определить среднеарифметическое значение времени  $t$ .

2. Вычислить опытное значение кинематического коэффициента вязкости жидкости:

$$\nu = g d^2 t (\rho_w - \rho) / [18 l + 43,2 l (d/D)]$$

где  $g$  - ускорение свободного падения;  $d, D$  - диаметры шарика и цилиндрической емкости;  $\rho, \rho_w$  - плотности жидкости и материала шарика.

3. Сравнить опытное значение коэффициента вязкости  $\nu$  с табличным значением  $\nu^*$  (см. табл. 1). Значения используемых величин свести в таблицу 4.

**Таблица 4 - Таблица измеренных и вычисленных данных**

№ опыта	Вид жидкости	$\rho, кг/м^3$	$t, с$	$l, м$	$d, м$	$D, м$	$\rho_w, кг/м^3$	$\nu, м^2/с$	$\nu^*, м^2/с$
1	М -10					0,02			
2	М - 10					0,02			
3	М - 10					0,02			

**Измерение кинематической вязкости капиллярным вискозиметром**

Капиллярный вискозиметр 4 включает емкость с капилляром. Вязкость определяется по времени истечения жидкости из емкости через капилляр.

1. Перевернуть устройство № 1 (см. рис. 1) в вертикальной плоскости и определить секундомером время  $t$  истечения через капилляр объема жидкости между метками (высотой  $S$ ) из емкости вискозиметра 4 и температуру  $T$  по термометру 1.

2. Вычислить значение кинематического коэффициента вязкости  $\nu = M t$  ( $M$  - постоянная прибора) и сравнить его с табличным значением  $\nu^*$  (см. табл. 1). Данные свести в таблицу 5.

**Таблица 5 - Таблица измеренных и вычисленных данных**

№ опыта	Вид жидк.	$M, м^2/с^2$	$t, с$	$\nu, м^2/с$	$T, ^\circ C$	$\nu^*, м^2/с$
1	М -10					
2	М - 10					
3	М - 10					

*Примечание:* В табл. 1 приведены значения коэффициента вязкости жидкостей при температуре  $20^\circ C$ . Поэтому опытные значения, полученные при другой температуре, могут существенно отличаться от табличных значений.

### **Измерение поверхностного натяжения сталагмометром**

Сталагмометр 5 служит для определения поверхностного натяжения жидкости методом отрыва капель и содержит емкость с капилляром, расширенным на конце для накопления жидкости в виде капли. Сила поверхностного натяжения в момент отрыва капли равна ее весу (силе тяжести) и поэтому определяется по плотности жидкости и числу капель, полученному при опорожнении емкости с заданным объемом.

1. Перевернуть устройство № 1 и подсчитать число капель, полученных в сталагмометре 5 из объема высотой  $S$  между двумя метками. Опыт повторить три раза и вычислить среднее арифметическое значение числа капель  $n$ .

2. Найти опытное значение коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma = K\rho/n$  ( $K$  - постоянная сталагмометра) и сравнить его с табличным значением  $\sigma^*$  (см. табл. 1). Данные свести в таблицу 6.

**Таблица 6 - Таблица измеренных и вычисленных данных**

№ опыта	Вид жидк.	$K, м^3/с^2$	$\rho, кг/м^3$	$n$	$\sigma, Н/м$	$\sigma^*, Н/м$
1	М-10					
2	М-10					
3	М-10					

### **Обработка опытных данных и составление отчета**

## Контрольные вопросы

1. Перечислите основные физические свойства жидкостей
2. Какая связь существует между плотностью и удельным весом?
3. Что такое температурное расширение?
4. Что такое вязкость жидкости?
5. Запишите формулы для определения кинематической и динамической вязкости жидкости, их размерность
6. Как влияет температура и давление на физические свойства жидкости?
7. Объясните физический смысл поверхностного натяжения

## Тестовые задания к лабораторной работе 1

### **1. Плотностью жидкости называется отношение массы жидкости к**

1. ускорению свободного падения
2. растягивающему напряжению
3. температурному расширению
4. динамической вязкости
5. объему жидкости

### **2. Удельный вес связан с плотностью следующим соотношением**

1.  $\gamma = \rho\sigma$
2.  $\gamma = \rho\mu$
3.  $\gamma = \rho\nu$
4.  $\gamma = \rho g$
5.  $\gamma = \rho t$

### **3. Сжимаемостью жидкости называется свойство жидкости**

1. выделять воздушные пузырьки при ее встряхивании
2. изменять свой объем при изменении давления
3. принимать форму сосуда, в который она налита
4. образовывать кристаллы льда при замерзании
5. отдавать свою энергию в окружающую среду

### **4. Свойство жидкости изменять свой объем при изменении температуры называется**

1. молекулярным давлением
2. изотермическим течением
3. гидравлическим сопротивлением
4. температурным расширением
5. условным перемещением

### **5. Взаимное притяжение молекул жидкости, находящихся на свободной поверхности называется**

1. внешним напряжением
2. поверхностным натяжением
5. кислородным насыщением
4. хаотичным смешиванием
5. противодействием

Работу выполнил \_\_\_\_\_

(Ф.И.О. студента, номер группы)

Работу принял \_\_\_\_\_

(дата, Ф.И.О. преподавателя)

## РАБОТА 2. ИЗУЧЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

**Цель работы:** Изучение устройства и принципа действия жидкостных приборов для измерения давления

**Приборы, устройства и материалы:** Устройство № 2 включает в себя полость с атмосферным давлением, опытный резервуар; пьезометр; уровнемер; мановакуумметр; вакуумметр (рис. 2)

### Теория и основные положения

*Гидростатическим давлением* называют нормальное сжимающее напряжение в неподвижной жидкости, т. е. силу, действующую на единицу площади поверхности. За единицу измерения давления в международной системе принят паскаль [ $Па = Н/м^2$ ].

Различают абсолютное, атмосферное, манометрическое и вакуумметрическое давления.

*Абсолютное* (полное) *давление*  $p$  отсчитывается от абсолютного вакуума. *Атмосферное давление*  $p_a$  создается силой тяжести воздуха атмосферы и принимается в обычных условиях равным  $101325 Па$  или  $760 мм рт. ст.$  Избыток давления над атмосферным называют *манометрическим* (избыточным) *давлением* ( $p_m = p - p_a$ ), а недостаток до атмосферного давления - *вакуумметрическим давлением* ( $p_v = p_a - p$ ).

Приборы для измерения атмосферного давления назвали *барометрами*, манометрического - *манометрами*, вакуума - *вакуумметрами*. По принципу действия и типу рабочего элемента приборы подразделяются на жидкостные, механические и электрические.

*Жидкостные приборы* исторически стали применяться первыми. Их действие основано на принципе уравнивания измеряемого давления  $p$  силой тяжести столба жидкости высотой  $h$  в приборе:

$$p = \rho gh,$$

где  $\rho$  - плотность жидкости;  $g$  - ускорение свободного падения,  $h$  – глубина погружения.

Поэтому величина давления может быть выражена высотой столба жидкости  $h$  (мм рт. ст., м вод. ст.). Преимуществами жидкостных приборов являются простота конструкции и высокая точность, однако они удобны только при измерении небольших давлений.

В *механических приборах* измеряемое давление вызывает деформацию чувствительного элемента (трубка, мембрана, сильфон), которая с помощью специальных механизмов передается на указатель. Такие приборы компактны и имеют большой диапазон измеряемых давлений.

В *электрических приборах* воспринимаемое чувствительным элементом давление преобразуется в электрический сигнал. Сигнал регистрируется показывающим (вольтметр, амперметр) или пишущим (самописец, осциллограф) приборами. В последнем случае можно фиксировать давление при быстропротекающих процессах.

### Описание устройства № 2 и жидкостных приборов

*Ртутный барометр* состоит из вертикальной стеклянной трубки с миллиметровой шкалой и закрытым верхним концом, которая заполнена ртутью, и чаши с ртутью, в которую опущена трубка нижним концом. Таким прибором впервые было измерено атмосферное давление итальянским ученым Э. Торричелли в 1642 г.

Для демонстрации других приборов служит *устройство № 2*, которое выполнено прозрачным и имеет полость 1, в которой всегда сохраняется атмосферное давление, и резервуар 2, частично заполненный водой (рис. 2, а). Для измерения давления и уровня жидкости в ре-

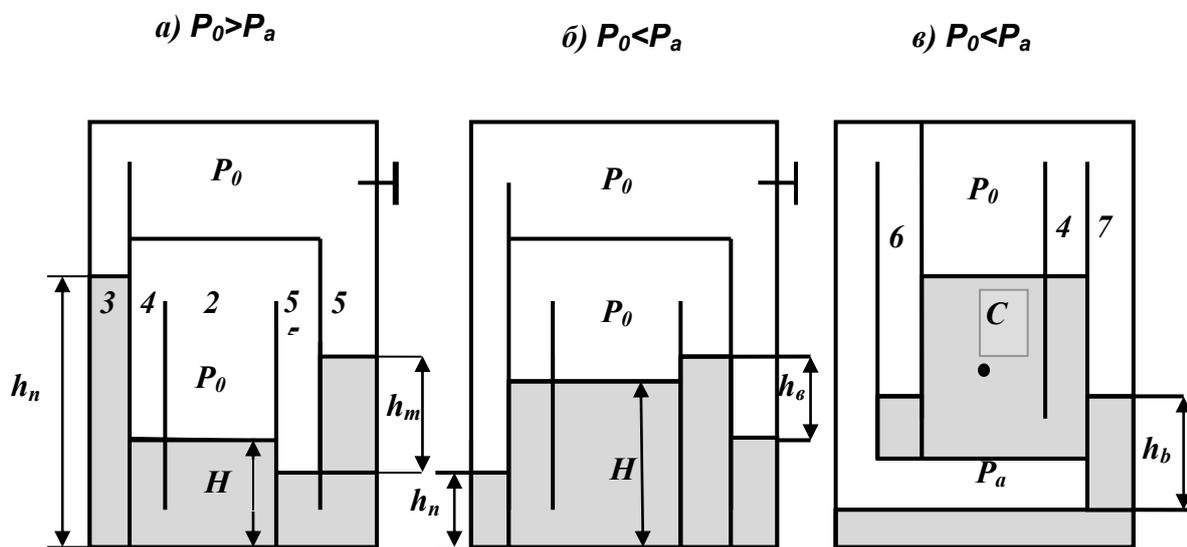
резервуаре 2 служат жидкостные приборы 3, 4 и 5. Они представляют собой прозрачные вертикальные каналы со шкалами, размеченными в единицах длины.

*Однотрубный манометр (пьезометр) 3* сообщается верхним концом с атмосферой, а нижним - с резервуаром 2. Им определяется манометрическое давление  $p_m = pgh_n$  на дне резервуара.

*Уровнемер 4* соединен обоими концами с резервуаром и служит для измерения уровня жидкости  $H$  в нем.

*Мановакуумметр 5* представляет собой U - образный канал, частично заполненный жидкостью. Левым коленом он подключен к резервуару 2, а правым - к полости 1 и предназначен для определения манометрического  $p_{m0} = pgh_m$  (рис. 2 а) или вакуумметрического  $p_{в0} = pgh_b$  (рис. 2, б) давлений над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2. Давление в резервуаре можно изменять путем наклона устройства.

При повороте устройства в его плоскости на  $180^\circ$  против часовой стрелки (рис. 2 в) канал 4 остается уровнемером, колено мановакуумметра 5 преобразуется в пьезометр 6, а пьезометр 3 - в вакуумметр (обратный пьезометр) 7, служащий для определения вакуума  $p_{в0} = pg h_b$  над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2.



1 - полость с атмосферным давлением; 2 - опытный резервуар; 3 - пьезометр; 4 - уровнемер; 5 - мановакуумметр; 6 - пьезометр; 7 - вакуумметр

Рисунок 2 - Схема устройства № 2

### Контрольные вопросы

1. Что такое «гидростатическое давление»?
2. В каких единицах оно измеряется?
3. Какими свойствами обладает гидростатическое давление?
4. Перечислите приборы для измерения давления жидкости
5. Достоинства и недостатки жидкостных, механических и электрических приборов для измерения гидростатического давления

## Тестовые задания к лабораторной работе 2

**1. Гидростатическим давлением называется напряжение, возникающее в жидкости под действием**

1. атмосферного давления
2. агрессивных компонентов
3. собственного веса
4. нагревания
5. поверхностных и массовых сил

**2. Гидростатическое давление направлено**

1. вертикально вниз
2. ортогонально к свободной поверхности
3. по внутренней нормали к площадке действия
4. по касательной к площадке действия
5. под углом  $45^0$  к линии горизонта

**3. Гидростатическое давление в точке зависит от**

1. температуры жидкости
2. веса жидкости
3. координат и плотности жидкости
4. упругих свойств жидкости
5. количества растворенных в жидкости газов

**4. Единица гидростатического давления в системе СИ принята**

1. ньютон – Н
2. паскаль – Па
3. джоуль – Дж
4. ватт – Вт
5. градус Цельсия -  $^0\text{C}$

**5. Прибор для измерения давления жидкости меньше атмосферного называется**

1. мультипликатор
2. дифференциальный манометр
3. вакууметр
4. вискозиметр
5. пьезометр

Работу выполнил \_\_\_\_\_  
(Ф.И.О. студента, номер группы)

Работу принял \_\_\_\_\_  
(дата, Ф.И.О. преподавателя)

### РАБОТА 3. ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

**Цель работы:** Приобретение навыков по измерению гидростатического давления жидкостными приборами

**Приборы, устройства и материалы:** Устройство № 2 включает в себя полость с атмосферным давлением; опытный резервуар; пьезометр; уровнемер; мановакуумметр; вакуумметр (рис. 2).

#### Теория и основные положения

Абсолютное давление в любой точке покоящейся жидкости определяется по *основному уравнению гидростатики*:

$$p = p_0 + \rho g H,$$

где  $p_0$  - абсолютное давление на свободной поверхности жидкости;  $\rho$  - плотность жидкости;  $H$  - глубина погружения точки под свободной поверхностью.

Обычно абсолютное давление сравнивают с атмосферным. Превышение давления над атмосферным называют избыточным (манометрическим) давлением:

$$p_M = p - p_{at}$$

Если  $p_0 = p_{at}$ , то  $p_M = p_0 + \rho g H - p_{at} = \rho g H$ .

Недостаток давления до атмосферного называют вакуумом:

$$p_{vak} = p_{at} - p$$

В работе вычисляется давление в заданной точке (например, на дне резервуара) через показания различных приборов и затем сравниваются результаты, полученные двумя путями.

#### Порядок выполнения работы и методика измерений

1. В резервуаре 2 над жидкостью создать давление выше атмосферного ( $p_o > p_a$ ), о чем свидетельствуют превышение уровня жидкости в пьезометре 3 над уровнем в резервуаре и прямой перепад уровней в мановакуумметре 5 (рис. 2, а). Для этого устройство поставить на правую сторону, а затем поворотом его против часовой стрелки отлить часть жидкости из левого колена мановакуумметра 5 в резервуар 2.

2. Снять показания пьезометра  $h_n$ , уровнемера  $H$  и мановакуумметра  $h_M$ .

3. Вычислить абсолютное давление на дне резервуара через показания пьезометра, а затем - через величины, измеренные уровнемером и мановакуумметром. Для оценки сопоставимости результатов определения давления на дне резервуара двумя путями найти относительную погрешность  $\delta p$ .

4. Над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2 создать вакуум ( $p_o < p_a$ ), когда уровень жидкости в пьезометре 3 становится ниже, чем в резервуаре, а на мановакуумметре 5 появляется обратный перепад  $h_e$  (рис.2, б). Для этого поставить устройство на левую сторону, а затем наклоном вправо отлить часть жидкости из резервуара 2 в левое колено мановакуумметра 5. Далее выполнить операции по п.п. 2 и 3.

5. Перевернуть устройство против часовой стрелки (рис 2, в) и определить манометрическое или вакуумметрическое давление в заданной преподавателем точке С через показания пьезометра 6, а затем, с целью проверки, найти его через показания обратного пьезометра 7 и уровнемера 4.

В процессе проведения опытов и обработки экспериментальных данных заполнить таблицу 7.

**Таблица 7 - Таблица измеренных и вычисленных данных**

№ п/п	Наименование величин	Обозначе- ния, фор- мулы	Номер опыта					
			1		2		3	
			$p_0 > p_a$	$p_0 < p_a$	$p_0 > p_a$	$p_0 < p_a$	$p_0 > p_a$	$p_0 < p_a$
1	Пьезометрическая высота, $m$	$h_n$						
2	Уровень жидкости в резервуаре, $m$	$H$						
3	Манометрическая высота, $m$	$h_m$						
4	Вакуумметрическая высота, $m$	$h_b$						
5	Абсолютное давле- ние на дне резервуа- ра по показанию пье- зометра, $Pa$	$p = p_0 + \rho g h_n$						
6	Абсолютное давле- ние в резервуаре над жидкостью, $Pa$	$p_0 = p_a + \rho g h_m$ $p_0 = p_a - \rho g h_b$						
7	Абсолютное давле- ние на дне резервуа- ра через показания мановакуумметра и уровнемера, $Pa$	$p^* = p_0 + \rho g H$						
8	Относительная по- грешность результа- тов определения дав- ления на дне резер- вуара, %	$\delta p^* = 100(p - p^*)/p$						

*Примечание.* Принять атмосферное давление  $p_a = 101325 Pa$ , плотность воды  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ .

**Обработка опытных данных и составление отчета**

### Контрольные вопросы:

1. Как записывается основное уравнение гидростатики?
2. Что такое пьезометрическая высота, манометрическая высота, вакуумметрическая высота?
3. Что такое пьезометрический напор, полный гидростатический напор?
4. Как провести плоскость полного гидростатического напора?
5. Что такое абсолютное давление, манометрическое давление, вакуумметрическое давление? Как они определяются?

### Тестовые задания к лабораторной работе 3

2. Выражение  $z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g}$  называется уравнением

1. линий тока
2. Навье-Стокса
3. количества движения
4. касательного напряжения
5. гидростатики основное

3. Абсолютное давление в точке определяется по формуле:

1.  $p = p_0 + \rho gh$
2.  $p = p_0 - \rho gh$
3.  $p = p_{ат} + \rho gh$
4.  $p = p_{ат} - \rho gh$
5.  $p = p_{вак} + \rho gh$

4. Манометрическим называется давление

1. насыщенных паров
2. на свободной поверхности жидкости
3. на дне сосуда с жидкостью
4. превышающее атмосферное
5. в центре тяжести смоченной поверхности

5. Высота  $h = p_m / \rho g$  называется

1. геометрической
2. пьезометрической
3. приведенной
4. погруженной
5. скоростной

Работу выполнил \_\_\_\_\_  
(Ф.И.О. студента, номер группы)

Работу принял \_\_\_\_\_  
(дата, Ф.И.О. преподавателя)

## РАБОТА 4. ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ

**Цель работы:** Наблюдение потоков жидкости с различной структурой и выявление факторов, влияющих на структуру

**Приборы, устройства и материалы:** Устройство №3 выполнено в прозрачном корпусе и включает в себя два бака с успокоительной стенкой и равномерной шкалой, которые соединены между собой опытными каналами (рис. 3).

### Теория и основные положения

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

При резком изменении поперечного сечения или направления канала от его стенки отрывается *транзитная струя*, а у стенки жидкость начинает двигаться в обратном направлении, приводя к вращению жидкости между транзитной струей и стенкой. Эта область называется *циркуляционной* (вальцовой) *зоной*.

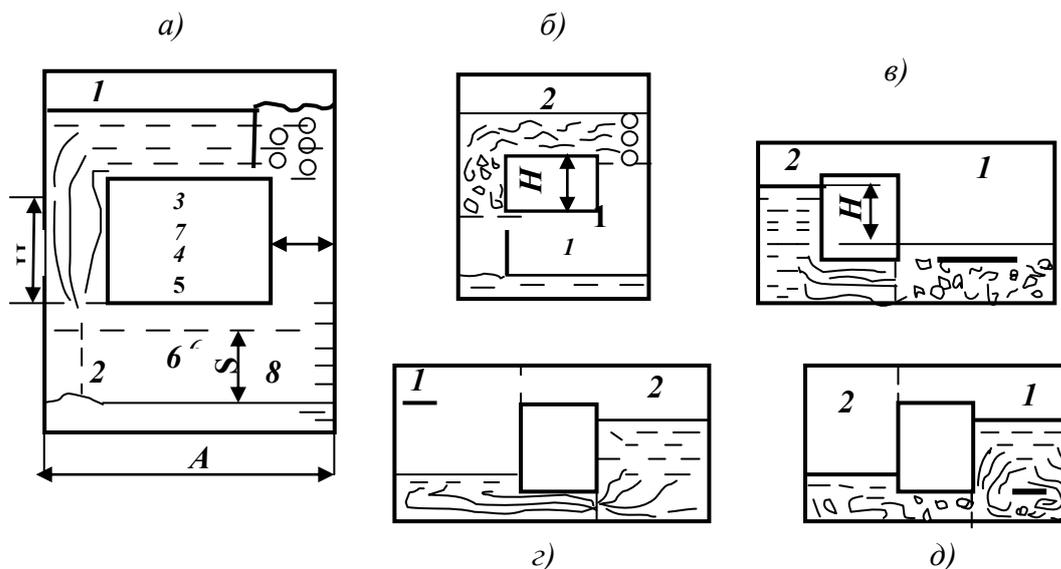
Для визуализации течений применяют меченые частицы (например, частицы алюминия) или окрашенные (например, чернилами или тушью) струйки, которые показывают *траектории* движения множества частиц жидкости. Они еще называются *линиями тока*, если течение установившееся. При *установившемся* (стационарном) *течении* осредненные значения скорости и давления в каждой точке потока постоянны во времени. В этом случае расход, т.е. количество жидкости, проходящее через заданное сечение в единицу времени, также не изменяется во времени.

### Описание устройства № 3

Устройство № 3 имеет прозрачный корпус (рис. 3, а), баки 1 и 2 с успокоительной стенкой 3 для гашения возмущений в жидкости от падения струй и всплывания пузырей воздуха. Баки между собой соединены опытными каналами 4 и 5 с одинаковыми сечениями. Конец канала 4 снабжен перегородкой со щелью 6, а противоположный конец канала 5 - решеткой (перегородкой с множеством отверстий) 7. Устройство заполнено водой, содержащей микроскопические частицы алюминия для визуализации течения. Уровень воды в баке 2 измеряется по шкале 8.

Устройство работает следующим образом. В положениях устройства (рис. 3, а, б) поступающая через левый канал в нижний бак вода вытесняет воздух в виде пузырей в верхний бак. Поэтому давления на входе в канал (на дне верхнего бака) и над жидкостью в нижнем баке уравниваются и истечение происходит под действием постоянного напора  $H$ , создаваемого столбом жидкости в левом канале. Так обеспечивается установившееся (с постоянным во времени расходом) движение жидкости. Причем в канале 4 устанавливается ламинарный режим благодаря низким скоростям течения из-за большого сопротивления щели 6. В свою очередь малое гидравлическое сопротивление решетки 7 обеспечивает получение турбулентного течения в канале 5 за счет больших скоростей (рис. 3, б). Расход можно уменьшать наклоном устройства от себя.

В случаях, указанных на рис. 3, в, г, д в каналах 4 и 5 возникает неустановившееся (при переменном напоре и расходе) движение жидкости за счет непосредственного соединения воздушных полостей баков. Это позволяет проследить за изменением структуры потоков в процессе уменьшения их скорости до нуля.



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

Рисунок 3 - Схема устройства № 3:

### Порядок выполнения работы и методика измерений

1. Создать в канале 4 ламинарный режим движения жидкости. Для этого при заполненном водой баке 1 поставить устройство баком 2 на стол (см. рис. 3, а). Наблюдать структуру потока.

2. Повернуть устройство в вертикальной плоскости по часовой стрелке на  $180^\circ$  (см. рис. 3, б). Наблюдать турбулентный режим движения в канале 5.

3. При заполненном водой баке 2 поставить устройство так, чтобы канал 5 (с решеткой) занял нижнее горизонтальное положение (см. рис. 3, в). Наблюдать в канале процесс перехода от турбулентного режима движения к ламинарному. Следует обратить внимание на турбулилизацию потока за решеткой.

4. При заполненном водой баке 2 поставить устройство так, чтобы канал 4 (со щелью) занял нижнее горизонтальное положение (рис. 3, г). Наблюдать за структурой потока в баке 2 при внезапном сужении, внезапном расширении в канале за щелью и при выходе потока из канала в бак 1. Обратить внимание на циркуляционные (вальцовые) зоны, транзитную струю и связь скоростей с площадями сечений каналов.

5. При заполненном баке 1 наблюдать структуру течения при обтекании перегородки 3 (рис. 3, д).

6. Сделать зарисовку структуры потоков для случаев, указанных в табл. 8

Таблица 8 – Структура потоков

Ламинарный режим	Турбулентный режим	Расширение потока	Обтекание стенки

## Контрольные вопросы

1. Что называется ламинарным и турбулентным режимами движения жидкости?
2. Дайте характеристику ламинарного и турбулентного движения
3. Какая скорость называется критической, как она определяется?
4. Дайте определение эквивалентного диаметра, чему он равен?
5. Что такое критерий Рейнольдса?

## Тестовые задания к лабораторной работе 4

### **1. Ламинарным называется режим движения жидкости при котором**

1. отсутствуют гидравлические сопротивления
2. изменяются площади живых сечений
3. частицы жидкости активно перемешиваются
4. нарушается сплошность потока
5. нет пульсаций местных скоростей

### **2. Турбулентным называется режим движения жидкости характеризующийся**

1. непрерывным перемешиванием частиц
2. отрывом потока от стен трубопровода
3. резким снижением скорости движения
4. сменой направления течения жидкости
5. возникновением в потоке кавитационных явлений

### **3. Скорость, при которой происходит смена режима движения жидкости, называется**

1. средней
2. местной
3. предельной
4. критической
5. затухающей

### **4. Нижнее критическое число Рейнольдса в трубах круглого сечения равно**

1. 1200
2. 2320
3. 3400
4. 6500
5. 7800

### **5. Область скоростей $v_k < v < v_k'$ называют**

1. пульсационной
2. кавитационной
3. водоворотной
4. транзитной
5. неустойчивой

Работу выполнил \_\_\_\_\_  
(Ф.И.О. студента, номер группы)

Работу принял \_\_\_\_\_  
(дата, Ф.И.О. преподавателя)

## РАБОТА 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

**Цель работы:** Освоение расчетного метода определения режима движения жидкости

**Приборы, устройства и материалы:** Устройство №3 выполнено в прозрачном корпусе и включает в себя два бака с успокоительной стенкой и равномерной шкалой, которые соединены между собой опытными каналами (рис. 3)

### Теория и основные положения

Критерием режима течения является число Рейнольдса:

$$Re = \nu d / \nu$$

где  $\nu$  - средняя скорость потока;  $d$  - внутренний диаметр трубы (канала);  $\nu$  - кинематический коэффициент вязкости жидкости.

В инженерной практике режим определяют путем сравнения числа Рейнольдса  $Re$  с его критическим значением  $Re_k$ , соответствующим смене режимов движения жидкости. Для равномерных потоков жидкости в трубах (каналах) круглого сечения принимают  $Re_k = 2300$ . Режим считается ламинарным, если  $Re < Re_k$ , и турбулентным при  $Re > Re_k$ .

Из критерия Рейнольдса следует, что числа Рейнольдса малы и, следовательно, режим ламинарный, при низких скоростях течения в каналах незначительного поперечного сечения (в порах грунта, капиллярах) или при движении жидкостей с большой вязкостью (нефть, масло, битумы).

Турбулентный режим в природе и технике встречается чаще. Его закономерностям подчиняется движение воды в реках, ручьях, каналах, системах водоснабжения и водоотведения, а также течение бензина, керосина и других маловязких жидкостей в трубах.

### Порядок выполнения работы и методика измерений

1. Создать в канале 4 течение жидкости (рис. 3, а) при произвольном наклоне устройства № 3 от себя.
2. Измерить время  $t$  перемещения уровня воды в баке на некоторое расстояние  $S$  и снять показания термометра  $T$ , находящегося в устройстве № 1.
3. Подсчитать число Рейнольдса по порядку, указанному в табл. 9.
4. Повернуть устройство в его плоскости на  $180^\circ$  (рис. 3, б) и выполнить операции по п.п. 2, 3.
5. Сравнить полученные значения чисел Рейнольдса между собой и затем на основе сравнения с критическим значением сделать вывод о режиме течения.

**Таблица 9 - Таблица измеренных и вычисленных данных**

№ п/п	Наименование величин	Обозначения, формулы	№ опыта	
			1	2
1.	Изменение уровня воды в баке, см	$S$		
2.	Время наблюдения за уровнем, с	$t$		
3.	Температура воды, $^\circ C$	$T$		
4.	Кинематический коэффициент вязкости воды, $см^2/с$	$\nu = 17,9 / (1000 + 34T + 0,22T^2)$		
5.	Объем воды поступившей в бак за время $t$ , $см^3$	$W = A B S$		
6.	Расход воды, $см^3/с$	$Q = W/t$		
7.	Средняя скорость течения в канале, см/с	$\nu = Q/\omega$		
8.	Число Рейнольдса	$Re = \nu d/\nu$		
9.	Название режима течения	$Re(<, >) Re_k = 2300$		

$$A = \dots \text{ см}; B = \dots \text{ см}; d = \dots \text{ см}; \omega = \dots \text{ см}^2$$

*Примечание.* Размеры поперечного сечения бака (A, B), гидравлический диаметр  $d$  и площадь поперечного сечения  $\omega$  опытных каналов указаны на корпусе устройства № 3.

## Обработка опытных данных и составление отчета

### Контрольные вопросы

1. Что такое критическое число Рейнольдса?
2. Как установить режим движения в соответствии с числом Рейнольдса?
3. Что такое ламинарная пленка?
4. Какие трубы называют гидравлически гладкими, а какие гидравлически шероховатыми?
5. От чего зависит коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  в различных областях сопротивления турбулентного режима движения?
6. Может ли труба гидравлически гладкая превратиться в гидравлически шероховатую за 2 секунды?

## Тестовые задания к лабораторной работе 5

1. Режим движения жидкости существенно влияет на:

1. параметры потока
2. вязкость жидкости
3. шероховатость трубы
4. потери напора

2. Число Рейнольдса определяется по формуле:

$$1. Re = \frac{Qd}{\nu}$$

$$2. Re = \frac{vd}{\nu}$$

$$3. Re = \frac{v\nu}{d}$$

$$4. Re = \frac{vd}{\nu}$$

$$5. Re = vd\nu$$

3. Нижнюю критическую скорость находят из выражения:

$$1. v_{кр.н} = \frac{Re_{кр.н} \nu}{d}$$

$$2. v_{кр.н} = \frac{Re_{кр.н} d}{\nu}$$

$$3. v_{кр.н} = \frac{Re_{кр.н}}{d\nu}$$

$$4. v_{кр.н} = \frac{vd}{Re_{кр.н}}$$

$$5. v_{кр.н} = Re_{кр.н} \nu d$$

4. При ламинарном напорном движении в трубе коэффициент Дарси определяется из выражения:

$$1. \lambda = 64Re$$

$$2. \lambda = \frac{64}{Re}$$

$$3. \lambda = 64 + Re$$

$$4. \lambda = 64 - Re$$

$$5. \lambda = Re - 64$$

5. Отношение  $\frac{\Delta}{d}$  называется:

1. гидравлическим радиусом
2. эквивалентным диаметром
3. коэффициентом пропорциональности
4. относительной шероховатостью
5. степенью турбулентности

Работу выполнил \_\_\_\_\_  
(Ф.И.О. студента, номер группы)

Работу принял \_\_\_\_\_  
(дата, Ф.И.О. преподавателя)

## РАБОТА 6. ИЛЛЮСТРАЦИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

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

**Приборы, устройства и материалы:** Устройство №4 включает в себя два бака, сообщаемых через опытные каналы переменного и постоянного сечения, уровнемерную шкалу и пьезометры (рис.4)

### Теория и основные положения

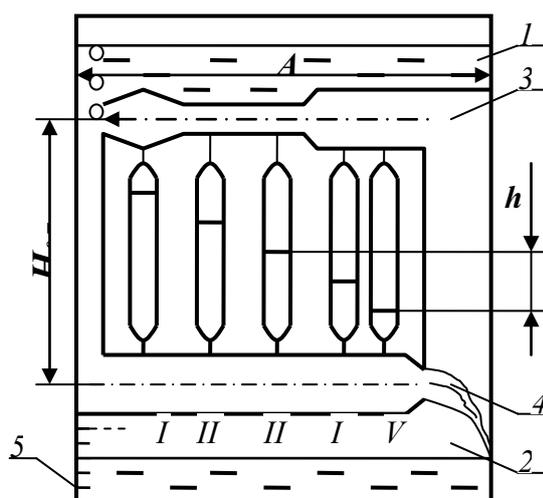
Уравнение Д. Бернулли выражает закон сохранения энергии и для двух сечений потока реальной жидкости в упрощенном виде записывается так:

$$z_1 + p_1/(\rho g) + v_1^2/(2g) = z_2 + p_2/(\rho g) + v_2^2/(2g) + h_{mp}$$

где  $z$  – координата центра тяжести сечения;  $p$  – давление;  $v$  – средняя скорость потока в сечении;  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h_{mp}$  – суммарные потери напора на преодоление гидравлических сил трения между сечениями 1-1 и 2-2; индексы «1» и «2» указывают номер сечения, к которому относится величина.

Слагаемые уравнения выражают энергии, приходящиеся на единицу веса (силы тяжести) жидкости, которые в гидравлике принято называть напорами:  $z$  – геометрический напор,  $p/(\rho g) = H_n$  – пьезометрический напор (потенциальная энергия),  $v^2/(2g) = H_k$  – скоростной напор (кинетическая энергия),  $p/(\rho g) + v^2/(2g) = H$  – полный напор (полная механическая энергия жидкости),  $h_{mp}$  – потери напора (механической энергии за счет ее преобразования в тепловую энергию). Такие энергии измеряются в единицах длины, т.к.  $Дж/Н = Нм/Н = м$ .

Из уравнения следует, что в случае отсутствия теплообмена потока с внешней средой полная удельная энергия (включая тепловую) неизменна вдоль потока, и поэтому изменение одного вида энергии приводит к противоположному по знаку изменению другого. Таков энергетический смысл уравнения Бернулли. Например, при расширении потока скорость  $v$  и, следовательно, кинетическая энергия  $v^2/(2g)$  уменьшаются, что в силу сохранения баланса вызывает увеличение потенциальной энергии  $p/(\rho g)$ . Другими словами, понижение скорости потока  $v$  по течению приводит к возрастанию давления  $p$ , и наоборот.



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

Рисунок 4 – Схема устройства №4

### Описание устройства №4

Устройство № 4 содержит баки 1 и 2, сообщаемые через опытные каналы переменного 3 и постоянного 4 сечений (рис. 4). Каналы соединены между собой равномерно расположенными пьезометрами I-V, служащими для измерения пьезометрических напоров в характерных сечениях. Устройство заполнено подкрашенной водой. В одном из баков предусмотрена шкала 5 для измерения уровня воды.

При перевертывании устройства благодаря постоянству напора истечения  $H_0$  во времени, обеспечивается установившееся движение воды в нижнем канале. Другой канал в это время пропускает воздух, вытесняемый жидкостью из нижнего бака в верхний.

### Порядок выполнения работы и методика измерений

1. При заполненном водой баке 2 (рис. 4) перевернуть устройство для получения течения в канале переменного сечения 3.

2. Снять показания пьезометров  $H_n = p/(pg)$  по нижним частям менисков воды в них.

3. Измерить время  $t$  перемещения уровня в баке на произвольно заданную величину  $S$ .

4. По размерам  $A$  и  $B$  поперечного сечения бака, перемещению уровня  $S$  и времени  $t$  определить расход  $Q$  воды в канале, а затем скоростные  $H_k$  и полные  $H$  напоры в сечениях канала по порядку, указанному в таблице 10.

5. Вычертить в масштабе канал с пьезометрами (рис. 4). Соединив уровни жидкости в пьезометрах с центром выходного сечения VI, получить *пьезометрическую линию 1*, показывающую изменение потенциальной энергии (давления) вдоль потока. Для получения *напорной линии 2* (линии полной механической энергии) отложить от оси канала полные напоры  $H$  и соединить полученные точки.

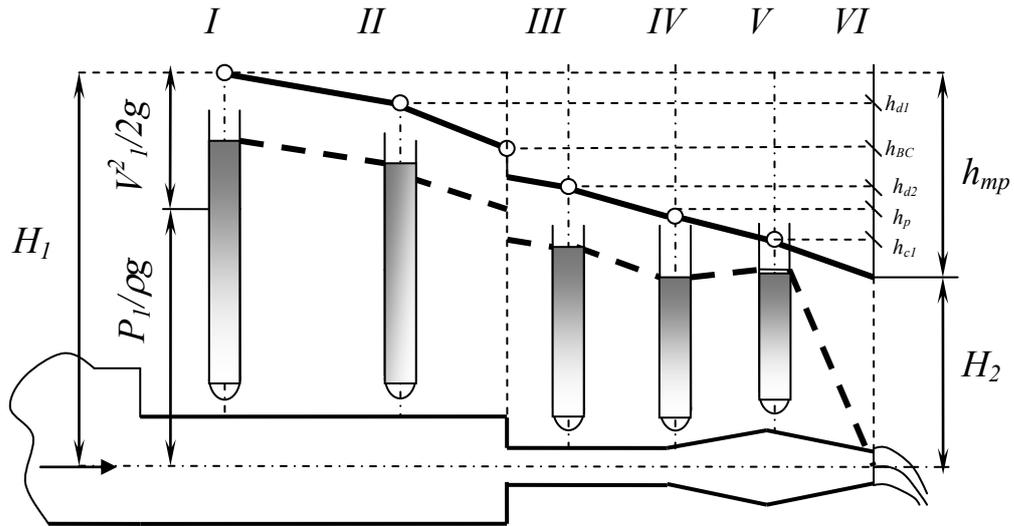
6. Проанализировать изменение полной механической  $H$ , потенциальной  $p/(pg)$  и кинетической  $v^2/(2g)$  энергий жидкости вдоль потока; выяснить соответствие этих изменений уравнению Бернулли.

**Таблица 10 - Таблица измеренных и вычисленных данных**

№ п/п	Наименование величин	Обозначения, формулы	Сечения канала					
			I	II	III	IV	V	VI
1.	Площадь сечения канала, $см^2$	$\omega$						
2.	Средняя скорость, $см/с$	$v = Q/\omega$						
3.	Пьезометрический напор, $см$	$H_n = p/(pg)$						
4.	Скоростной напор, $см$	$H_k = v^2/(2g)$						
5.	Полный напор, $см$	$H = p/(pg) + v^2/(2g)$						

$$A = \dots\dots\dots \text{ см}; B = \dots\dots\dots \text{ см}; S = \dots\dots \text{ см}; t = \dots\dots \text{ с}; Q = ABS/t = \dots\dots \text{ см}^3/\text{с}$$

### Обработка опытных данных и составление отчета



1, 2 - пьезометрическая и напорная линии;  
 $H_1, H_2$  – полные напоры (механическая энергия) на входе и выходе из канала;  
 $h_{mp}, h_{d1}, h_{d2}, h_{вс}, h_p, h_c$  – потери напора: суммарные, по длине на первом и втором участках, при внезапном сужении, на плавные расширения и сужения

Рисунок 5 – Иллюстрация уравнения Бернулли

**Графики изменения энергии в различных сечениях потока в соответствии с уравнением Бернулли**

## Контрольные вопросы

1. Как записывается уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной и реальной жидкостей, чем они отличаются?
2. Объясните геометрический и энергетический смысл каждого члена уравнения Бернулли
3. Почему составляющие уравнения Бернулли имеют размерность длины?
4. Что учитывает коэффициент кинетической энергии?
5. Как изменяются составляющие уравнения Бернулли при изменении скорости жидкости в трубе?

## Тестовые задания к лабораторной работе 6

**1. Уравнение Бернулли для двух сечений потока реальной жидкости имеет вид:**

1.  $H_1 = H_2/h_{1-2}$
2.  $H_1 = H_2 h_{1-2}$
3.  $H_1 = H_2 + h_{1-2}$
4.  $H_1 = H_2 - h_{1-2}$
5.  $H_1 + H_2 + h_{1-2} = 0$

**2. Слагаемое  $z$  в уравнении Бернулли для потока при плавно изменяющемся установившемся движении реальной жидкости с энергетической точки зрения называется**

1. удельной потенциальной энергией положения
2. удельной потенциальной энергией давления
3. удельной потенциальной энергией
4. удельной кинетической энергией
5. полной удельной энергией

**3. Слагаемое  $\alpha v^2/2g$  в уравнении Бернулли для потока при плавно изменяющемся установившемся движении реальной жидкости с геометрической точки зрения называется**

1. прыжковой функцией
2. параметром кинетичности
3. динамической вязкостью
4. эквивалентной шероховатостью
5. скоростной высотой

**4. Слагаемое  $h_{1-2}$  в уравнении Бернулли для потока при плавно изменяющемся установившемся движении реальной жидкости называется**

1. ударным давлением
2. актуальной скоростью
3. потерянными напором
4. транзитным расходом
5. коэффициентом обтекаемости

**5. Напорной называется линия, отстоящая от плоскости отсчета на расстоянии**

1.  $z$
2.  $p/\rho g$
3.  $z + p/\rho g$
4.  $z + p/\rho g + \alpha v^2/2g$
5.  $\alpha v^2/2g$

Работу выполнил \_\_\_\_\_

(Ф.И.О. студента, номер группы)

Работу принял \_\_\_\_\_

(дата, Ф.И.О. преподавателя)

## РАБОТА 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТНЫХ ПОТЕРЬ НАПОРА

**Цель работы:** Определение опытным путем потерь напора на преодоление местных сопротивлений и сравнение их с рассчитанными по инженерным формулам

**Приборы, устройства и материалы:** Устройство №4 включает в себя два бака, сообщаемых через опытные каналы переменного и постоянного сечения, уровнемерную шкалу и пьезометры (рис.4)

### Теория и основные положения

*Местные потери напора* (энергии) жидкости возникают на коротких участках трубопровода с препятствиями для потока, называемыми местными сопротивлениями (внезапное расширение и сужение труб, вентили, задвижки, клапаны, колена и др.). В таких местах образуются циркуляционные зоны, на завихрение жидкости в которых затрачивается часть механической энергии потока, называемая местными потерями напора. Величина местных потерь напора экспериментально определяется разностью полных напоров жидкости до и после местного сопротивления.

В инженерных расчетах для определения местных потерь напора используется формула  $h_m = \zeta v^2 / (2g)$ , где  $\zeta$  - коэффициент местного сопротивления (выбирается по справочнику);  $v$  - средняя скорость потока за местным сопротивлением.

### Порядок выполнения работы и методика измерений

1. Перенести из табл.10 значения площадей сечений и скоростей в табл.11.
2. Определить опытные значения местных потерь  $h_m$  ( $h_{ec}$ ,  $h_p$ ), из графика (см. рис. 5).
3. Найти расчетные значения местных потерь, сравнить их с опытными и объяснить расхождения.

**Таблица 11 - Таблица измеренных и вычисленных данных**

№ п/п	Наименования величин	Обозначения, формулы	Вид сопротивления			
			сужение		расширение	
			1 (II)	2(III)	1(IV)	2(V)
1	2	3	4	5	6	7
1	Площади сечений, $см^2$	$\omega$				
2	Средние скорости за сопротивлением, $см/с$	$v_2$				
3	Опытные значения местных потерь, $см$	$h_m$ ( $h_{ec}$ , $h_p$ )				
4	Коэффициенты местных сопротивлений	$\zeta_{ec} = 0,5(1 - \omega_2/\omega_1)$ $\zeta_{ep} = (\omega_2/\omega_1 - 1)^2$	.....		.....	
5	Расчетные значения местных потерь, $см$	$h_m = \zeta v_2^2 / (2g)$				

*Примечание:*  $\zeta_{ec}$ ,  $\zeta_{ep}$  – коэффициенты для внезапных сужения и расширения

## Обработка опытных данных и составление отчета

### Контрольные вопросы

1. Что называется местным сопротивлением?
2. Какие виды местных сопротивлений встречаются в трубопроводах?
3. Как зависит значение  $\zeta$  от скорости потока?
4. Зависит ли  $\zeta$  от числа  $Re$ ?
5. Как определить общие потери в трубопроводе?

## Тестовые задания к лабораторной работе №7

1. Средняя скорость движения жидкости в трубе определяется по формуле:

1.  $v = \frac{4Q}{\omega}$

2.  $v = \frac{Q}{\omega}$

3.  $v = \frac{\omega}{Q}$

4.  $v = Q\omega$

5.  $v = \frac{Q}{4\omega}$

2. Местные потери напора определяются по формуле:

1.  $h_m = \zeta v^2 2g$

2.  $h_m = \zeta \frac{2g}{v^2}$

3.  $h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}$

4.  $h_m = \zeta \frac{v}{2g}$

5.  $h_m = \frac{v^2}{\zeta 2g}$

3. Из выражения  $\delta = \frac{30d}{\text{Re}\sqrt{\lambda}}$  определяют:

1. скорость движения жидкости
2. коэффициент гидравлического сопротивления
3. потери напора
4. высоту выступов шероховатости
5. толщину ламинарной пленки

4. По соотношению между высотой выступов идеализированной шероховатости  $\Delta$  и толщиной вязкого подслоя  $\delta$  можно судить о

1. количестве местных сопротивлений в трубе
2. геометрических параметрах русла
3. области сопротивления при турбулентном режиме движения
4. способе присоединения трубы к резервуару
5. степени стеснения живого сечения потока

5. Потери напора по длине трубы круглого сечения при ламинарном движении пропорциональны средней скорости потока в степени

1. первой
2. второй
3. третьей
4. четвертой
5. пятой

Работу выполнил \_\_\_\_\_  
(Ф.И.О. студента, номер группы)

Работу принял \_\_\_\_\_  
(дата, Ф.И.О. преподавателя)

## РАБОТА 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА ПО ДЛИНЕ

**Цель работы:** Освоение экспериментального и расчетного способов определения потерь напора на трение по длине

**Приборы, устройства и материалы:** Устройство №4 включает в себя два бака, сообщаемых через опытные каналы переменного и постоянного сечения, уровнемерную шкалу и пьезометры (рис.4)

### Теория и основные положения

Потери напора по длине вызваны тормозящим действием стенок, приводящим к вязкостному трению частиц и струек жидкости друг о друга вдоль трубопровода. Они определяются по формуле:

$$h_l = \lambda(l/d)v^2/(2g),$$

где  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения;  $l, d$  — соответственно длина и внутренний диаметр трубы (канала);  $v$  - средняя скорость. В опытах потери напора по длине определяются разностью показаний пьезометров, установленных в начале и в конце опытного участка канала, т.к. скоростной напор не изменяется по пути.

### Порядок выполнения работы и методика измерений

1. При заполненном водой баке 1 поставить устройство № 4 на стол баком 2 (рис. 4).
2. Снять показания пьезометров I-V, измерить время  $t$  изменения уровня в баке на произвольно заданную величину  $S$  и температуру  $T$  в помещении.
3. Построить по показаниям пьезометров пьезометрическую линию. На этой линии выделить участок с постоянным уклоном (обычно участок III-V), соответствующий равномерному течению. Определить его длину  $l$  и *опытное* значение потерь  $h_{\text{дл}}$  по показаниям крайних пьезометров на нем (рис. 4).
4. Найти число Рейнольдса и *расчетное* значение потерь напора  $h_{\text{дл}}^*$  по порядку, указанному в табл. 12, и относительное расхождение опытного и расчетного значений потерь напора. Объяснить это расхождение.

**Таблица 12 - Таблица измеренных и вычисленных данных**

№ п/п	Наименование величин	Обозначения, формулы	Значение величин
1.	Показания пьезометров, см	$p_1/(\rho g), \dots, p_3/(\rho g)$	
2.	Длина участка с равномерным движением, см	$L$	
3.	Опытное значение потерь напора по длине, см	$h_{\text{дл}} = p_1/(\rho g) - p_3/(\rho g)$	
4.	Кинематический коэффициент вязкости воды, см <sup>2</sup> /с	$\nu = 17,9/(1000+34T+0,22T^2)$	
5.	Число Рейнольдса	$Re = vd/\nu$	
6.	Коэффициент трения при Re < 2300 2300 < Re < 10d/Δ Re > 10d/Δ	$\lambda = 64/Re$ $\lambda = 0,316/Re^{0,25}$ $\lambda = 0,11(68/Re + \Delta/d)^{0,25}$	
7.	Расчетное значение потерь напора по длине, см	$h_{\text{дл}}^* = \lambda(l/d)v^2/(2g)$	
8.	Относительное расхождение опытного и расчетного значений потерь	$\delta_h = (h_{\text{дл}} - h_{\text{дл}}^*)/h_{\text{дл}}$	

$$d = \dots\dots\dots \text{см}; \omega = \dots\dots\dots \text{см}^2; A = \dots\dots\dots \text{см}; B = \dots\dots\dots \text{см}; T = \dots\dots\dots {}^{\circ}\text{C}; S = \dots\dots\dots \text{см}; t = \dots\dots\dots \text{с}; Q = ABS/t = \dots\dots\dots \text{см}^3/\text{с}; v = Q/\omega = \dots\dots\dots \text{см}/\text{с}$$

*Примечание:* Абсолютную шероховатость стенок канала принять равной  $\Delta = 0,001$  мм

### **Обработка опытных данных и составление отчета**

### **Контрольные вопросы**

1. Как определяются потери напора по длине?
2. Как определяется коэффициент гидравлического сопротивления при ламинарном и турбулентном режимах движения жидкости?
3. Что такое гидравлически гладкие и шероховатые трубы?
4. Как вычислить толщину ламинарного пограничного слоя?
5. Какой степени скорости пропорциональны потери напора при различных режимах движения?

## Тестовые задания к лабораторной работе № 8

**1. При ламинарном режиме движения жидкости коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  является функцией**

- |                                       |                     |
|---------------------------------------|---------------------|
| 1. $\lambda = f(\text{Re})$           | 4. $\lambda = f(h)$ |
| 2. $\lambda = f(\Delta/d)$            | 5. $\lambda = f(Q)$ |
| 3. $\lambda = f(\text{Re}, \Delta/d)$ | 6. $\lambda = f(v)$ |

**2. Относительной шероховатостью стен трубопровода называется отношение эквивалентной шероховатости к**

1. плотности жидкости
2. вязкости жидкости
3. длине трубопровода
4. диаметру трубопровода
5. толщине стен трубопровода

**3. В турбулентном режиме движения жидкости вблизи стен трубопровода сохраняется вязкий подслей, в пределах которого движение жидкости близко к ламинарному.**

**Этот подслей называется:**

1. магистральная зона
2. коррозионный слой
3. ламинарная пленка
4. прибойная волна
5. транзитная струя

**4. В турбулентном режиме движения существует три области сопротивления: область гидравлически гладких труб, переходная область и**

1. область повышенного давления
2. область вихревого движения
3. область критических скоростей
4. квадратичная область
5. область затопления

**5. Все потери удельной энергии, затрачиваемой на преодоление сопротивлений движению жидкости, можно разделить на два вида:**

1. реальные и идеальные
2. расчетные и справочные
3. опытные и теоретические
4. постоянные и временные
5. по длине и местные

Работу выполнил \_\_\_\_\_  
(Ф.И.О. студента, номер группы)

Работу принял \_\_\_\_\_  
(дата, Ф.И.О. преподавателя)

Учебное издание

Владимир Васильевич Кузнецов  
Владимир Константинович Спиридонов  
Людмила Александровна Паршикова  
Александр Михайлович Случевский

**РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ С МЕТОДИЧЕСКИМИ УКАЗАНИЯМИ  
к выполнению лабораторных работ по гидравлике  
с применением портативной лаборатории «КАПЕЛЬКА»**

Редактор Павлютина И.П.

---

Подписано к печати .15.01.2014. Формат 60x84 1/16.  
Бумага печатная. Усл. п.л. 1,86. Тираж 20 экз. Изд. №2493.

---

Издательство Брянской государственной сельскохозяйственной академии  
243365 Брянская область, Выгоничский район, с. Кокино, Брянская ГСХА