

## РАБОТА 1. ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ

**Цель работы.** Освоение техники измерения плотности, теплового расширения, вязкости и поверхностного натяжения жидкостей.

### 1.1. Общие сведения

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

**Плотность** - отношение массы  $m$  жидкости к её объёму  $W$ :  $\rho = m/W$ .

**Сжимаемость** - свойство жидкости уменьшать объём под действием давления. Она оценивается **коэффициентом сжимаемости**  $\beta_p$ , показывающим относительное уменьшение объёма жидкости  $W$  при повышении давления  $p$  на единицу:  $\beta_p = (\Delta W/W) / \Delta p$ .

**Тепловое расширение** - свойство жидкости изменять объём при нагревании - характеризуется **коэффициентом теплового расширения**  $\beta_T$ , равным относительному приращению объёма  $W$  с изменением температуры  $T$  на один градус при постоянном давлении:  $\beta_T = (\Delta W/W) / \Delta T$ . Как правило, при нагревании объём жидкости увеличивается.

**Вязкость** - свойство жидкости сопротивляться относительному скольжению ее слоев. Ее оценивают **динамическим коэффициентом вязкости**  $\mu$ , который измеряется в паскаль-секундах (Па·с) и равен касательному напряжению между соседними слоями, если их относительная скорость перемещения численно совпадает с толщиной слоя. **Кинематический коэффициент вязкости**  $\nu$  определяют из формулы  $\nu = \mu / \rho$  и измеряют квадратными метрами на секунду ( $m^2/c$ ) или стокса-

ми ( $1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/c$ ). Эти коэффициенты определяются видом жидкости, не зависят от скорости течения, существенно уменьшаются с возрастанием температуры.

**Поверхностное натяжение** - свойство жидкости образовывать поверхностный слой взаимно притягивающихся молекул - характеризуется **коэффициентом поверхностного натяжения**  $\sigma$ , равным силе на единице длины контура свободной поверхности. Значения  $\rho$ ,  $\beta_p$ ,  $\beta_T$ ,  $\nu$  и  $\sigma$  при  $20^\circ\text{C}$  указаны в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Жидкость	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\beta_p \cdot 10^3$ , МПа <sup>-1</sup>	$\beta_T \cdot 10^3$ , °C <sup>-1</sup>	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\sigma \cdot 10^3$ , 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
АМГ - 10	850	0,76	0,83	20	25

### 1.2. Описание устройства № 1

Устройство для изучения физических свойств жидкости содержит 5 приборов, выполненных в общем прозрачном корпусе (рис. 1.1), на котором указаны параметры для обработки опытных данных. Приборы 3-5 начинают действовать при перевертывании устройства № 1. Термометр 1 показывает температуру окружающей среды и, следовательно, температуру жидкостей во всех устройствах.

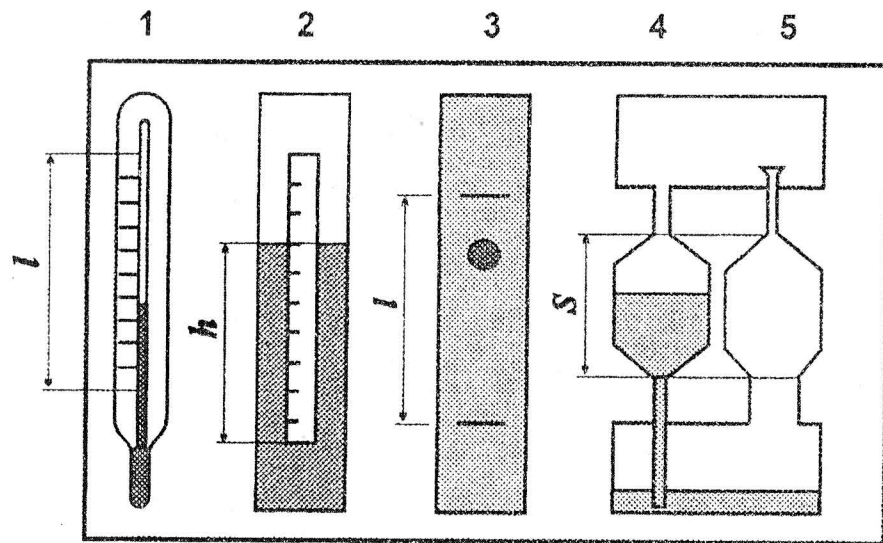


Рис. 1.1. Схема устройства №1:  
 1 - термометр; 2 - ареометр; 3 - вискозиметр Стокса;  
 4 - капиллярный вискозиметр; 5 - сталагмометр

### 1.3. Порядок выполнения работы

#### 1.3.1. Определение коэффициента теплового 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.

Коэффициент теплового расширения термометрической жидкости определяется в следующем порядке на основе мыс-

ленного 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  $\beta_T = (\Delta W/W) / \Delta T$  и сравнить его со справочным значением  $\beta_T^*$  (табл. 1.1). Значения используемых величин занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Вид жидкости	$r$ , см	$W$ , см <sup>3</sup>	$\Delta T$ , °C	$l$ , см	$\Delta W$ , см <sup>3</sup>	$\beta_T$ , °C <sup>-1</sup>	$\beta_T^*$ , °C <sup>-1</sup>
Спирт							

#### 1.3.2. Измерение плотности жидкости ареометром

Ареометр 2 служит для определения плотности жидкости поплавковым методом. Он представляет собой пустотельный 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.1.1). Значения используемых величин свести в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

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

### 1.3.3. Определение 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° 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

$$\nu = g d^2 t (\rho_w / \rho - 1) / [18l + 43.2l (d/D)],$$

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.1.1). Значения используемых величин свести в таблицу 1.4.

Таблица 1.4

Вид жидкости	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$t$ , с	$l$ , м	$d$ , м	$D$ , м	$\rho_w$ , кг/м <sup>3</sup>	$\nu$ , м <sup>2</sup> /с	$\nu^*$ , м <sup>2</sup> /с
М-10					0,02			

Примечание. В устройстве № 1 вместо вискозиметра Стокса может быть встроен вискозиметр – плотномер конструкции ТГАСУ, в котором шарик падает с малым зазором в открытой с обоих концов трубке. В этом случае следует: зафиксировать время падения шарика  $t$  и перепад уровней жидкости  $h$  в цилиндрической емкости и трубке; вычислить значения плотности жидкости  $\rho = \rho_w / (1 + A h)$  и кинематический коэффициент вязкости  $\nu = B h t$ , где  $A$  и  $B$  – постоянные прибора.

### 1.3.4. Измерение 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. 1.1) 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. 1.1). Данные свести в таблицу 1.5.

Таблица 1.5

Вид жидкости	$M$ , м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	$t$ , с	$\nu$ , м <sup>2</sup> /с	$T$ , °С	$\nu^*$ , м <sup>2</sup> /с
М-10					

Примечание. В табл. 1.1 приведены значения коэффициента вязкости жидкостей при температуре 20 °С. Поэтому опытные значения, полученные при другой температуре, могут существенно отличаться от табличных значений.

### 1.3.5. 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.1.1). Данные свести в таблицу 1.6.

Таблица 1.6

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

## РАБОТА 2. ИЗУЧЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

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

### 2.1. Общие сведения

**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 ( $\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$ ).

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  $101325 \text{ Па}$  или  $760 \text{ мм рт. ст.}$  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 называли **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:

$$p = \rho g h,$$

где  $\rho$  - плотность жидкости;

$g$  - ускорение свободного падения.

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.

## 2.2. 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. 2.1, а). Для измерения давления и уровня жидкости в 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  $p_m = \rho g h_m$  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  $p_{мо} = \rho g h_m$  (рис. 2.1, а) или вакуумметрического  $p_{во} = \rho g h_v$  (рис. 2.1, б) давлений над свободной поверхностью жидкости в резер-

вуаре 2. Давление в резервуаре можно изменять путем наклона устройства.

При повороте устройства в его плоскости на  $180^\circ$  против часовой стрелки (рис. 2.1, в) канал 4 остается уровнемером, колено мановакуумметра 5 преобразуется в пьезометр 6, а пьезометр 3 - в *вакуумметр (обратный пьезометр) 7*, служащий для определения вакуума  $p_{во} = \rho g h_v$  над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2.

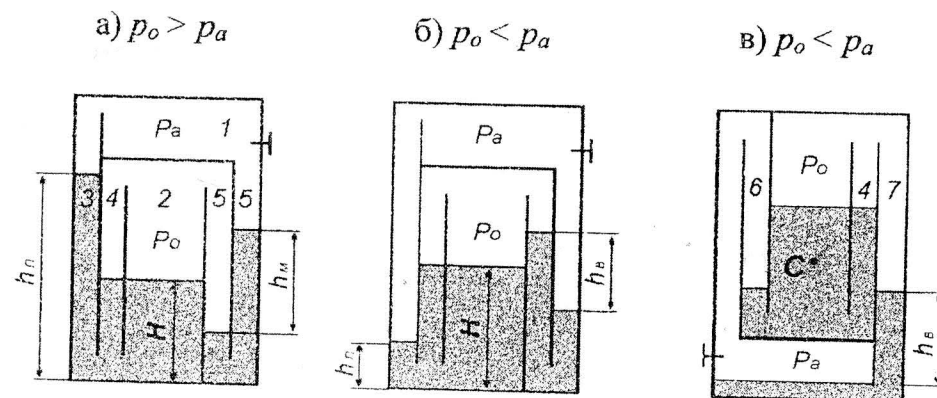


Рис. 2.1. Схема устройства № 2:

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

## РАБОТА 3. ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

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

### 3.1. Общие сведения

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.

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

### 3.2. Порядок выполнения работы

1. В резервуаре 2 над жидкостью создать давление выше атмосферного ( $p_0 > p_a$ ), о чем свидетельствуют превышение уровня жидкости в пьезометре 3 над уровнем в резервуаре и прямой перепад уровней в мановакуумметре 5 (рис. 2.1, 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 сопос-

тавимости результатов определения давления на дне резервуара двумя путями найти относительную погрешность  $\delta p$ .

4. Над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2 создать вакуум ( $p_0 < p_a$ ), когда уровень жидкости в пьезометре 3 становится ниже, чем в резервуаре, а на мановакуумметре 5 появляется обратный перепад  $h_e$  (рис. 2.1, 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. 2.1, в) и определить манометрическое или вакуумметрическое давление в заданной преподавателем точке  $C$  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 2.1.

## РАБОТА 4. ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ

Таблица 2.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначения, формулы	Условия опыта	
			$P_o > P_a$	$P_o < P_a$
1.	Пьезометрическая высота, м	$h_n$		
2.	Уровень жидкости в резервуаре, м	$H$		
3.	Манометрическая высота, м	$h_m$		-----
4.	Вакуумметрическая высота, м	$h_v$	-----	
5.	Абсолютное давление на дне резервуара по показанию пьезометра, Па	$p = p_a + \rho g h_n$		
6.	Абсолютное давление в резервуаре над жидкостью, Па	$p_o = p_a + \rho g h_m$ $p_o = p_a - \rho g h_v$		-----
7.	Абсолютное давление на дне резервуара через показания мановакуумметра и уровнемера, Па	$p^* = p_o + \rho g H$		
8.	Относительная погрешность результатов определения давления на дне резервуара, %	$\delta p = 100(p - p^*) / p$		

Примечание. Принять атмосферное давление  $p_a = 101325$  Па, плотность воды  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>.

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

### 4.1. Общие сведения

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

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.

## 4.2. Описание устройства № 3

Устройство № 3 имеет прозрачный корпус (рис. 4.1, 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 каналами 4 и 5 с одинаковыми сечениями. Конец канала 4 снабжен перегородкой с щелью 6, а противоположный конец канала 5 - решеткой (перегородкой со 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. 4.1, 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. 4.1, б). Расход можно уменьшать наклоном устройства от себя.

В случаях, указанных на рис. 4.1, 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.

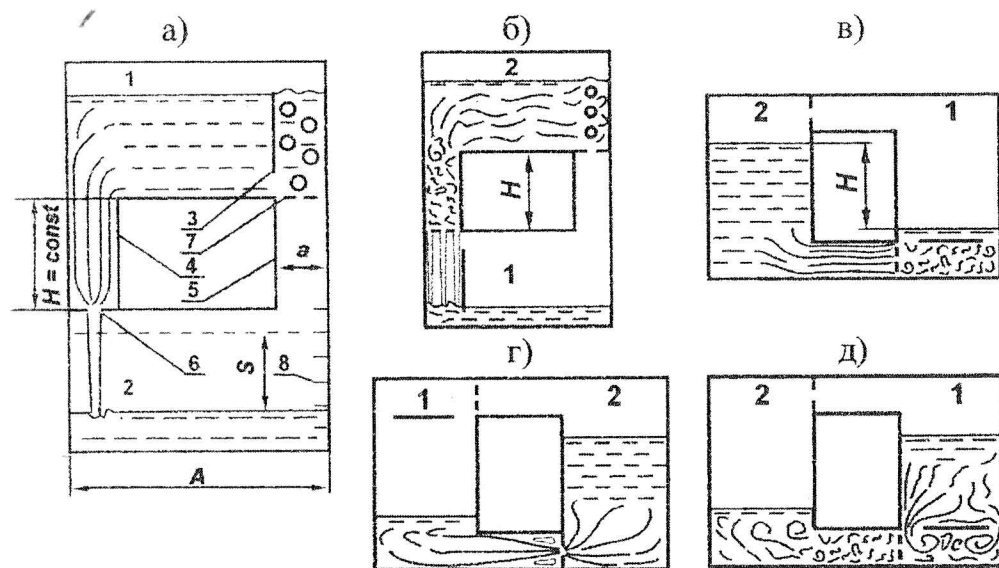


Рис. 4.1. Схема устройства № 3:

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

## 4.3. Порядок выполнения работы

1. Создать в канале 4 ламинарный режим движения жидкости. Для этого при заполненном водой баке 1 поставить устройство баком 2 на стол (см. рис. 4.1, а). Наблюдать структуру потока.

2. Повернуть устройство в вертикальной плоскости по часовой стрелке на  $180^\circ$  (см. рис. 4.1, б). Наблюдать турбулентный режим течения в канале 5.

3. При заполненном водой баке 2 поставить устройство так, чтобы канал 5 (с решеткой) занял нижнее горизонтальное положение (см. рис. 4.1, в). Наблюдать в канале про-



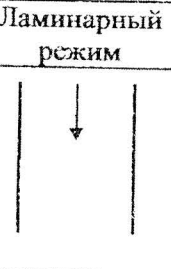
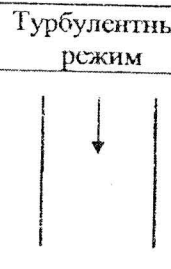

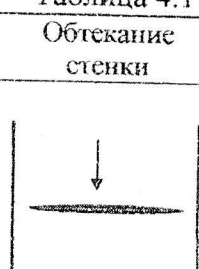
цесс перехода от турбулентного режима движения к ламинарному. Обратите внимание, что решетка приводит к турбулизации потока за ней.

4. При заполненном водой баке 2 поставить устройство так, чтобы канал 4 (с щелью) занял нижнее горизонтальное положение (рис. 4.1, 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. Обратите 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. 4.1, д).

6. Сделать зарисовку структуры потоков для случаев, указанных в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Ламинарный режим	Турбулентный режим	Расширение потока	Обтекание стенки
			

## РАБОТА 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ

**Цель работы.** Освоение расчетного метода определения режима течения.

### 5.1. Общие сведения

Критерием режима течения является число Рейнольдса

$$Re = Vd / \nu, \quad (4.1)$$

где  $V$  – 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  $Re \geq Re_k$ .

Из выражения (4.1) 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.

### 5.2. Порядок выполнения работы

1. Создать в канале 4 течение жидкости (рис. 4.1, 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. 5.1.

4. Повернуть устройство в его плоскости на  $180^\circ$  (рис. 4.1, 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 5.1

№ 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, $^\circ\text{C}$	$T$		
4.	Кинематический коэффициент вязкости воды, $\text{см}^2/\text{с}$	$\nu = 17.9/(1000 + 34T + 0.22T^2)$		
5.	Объем воды, поступившей в бак за время $t$ , $\text{см}^3$	$W = A B S$		
6.	Расход воды, $\text{см}^3/\text{с}$	$Q = W/t$		
7.	Средняя скорость течения в канале, $\text{см}/\text{с}$	$V = Q/\omega$		
8.	Число Рейнольдса	$Re = Vd/\nu$		
9.	Название режима течения	$Re (<, >) Re_k = 2300$		

$A = 2.2 \text{ см}; B = 4 \text{ см}; d = 1.2 \text{ см}; \omega = 2 \text{ см}^2$

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

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).

6.1. Общие сведения

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

$$P_1/(\rho g) + V_1^2/(2g) = P_2/(\rho g) + V_2^2/(2g) + h_{тр},$$

где  $P$  – давление;  $V$  – средняя скорость потока в сечении;  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h_{тр}$  – 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:  $P/(\rho g) = H_n$  – 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),  $h_{тр}$  – потери напора (механической энергии за счет ее преобразования в тепловую энергию). Такие энергии измеряются в единицах длины, т.к.  $\text{Дж}/\text{Н} = \text{Нм}/\text{Н} = \text{м}$ .

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.

### 6.2. Описание устройства № 4

Устройство № 4 содержит баки 1 и 2, сообщаемые через опытные каналы переменного 3 и постоянного 4 сечений (рис. 6.1). 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.

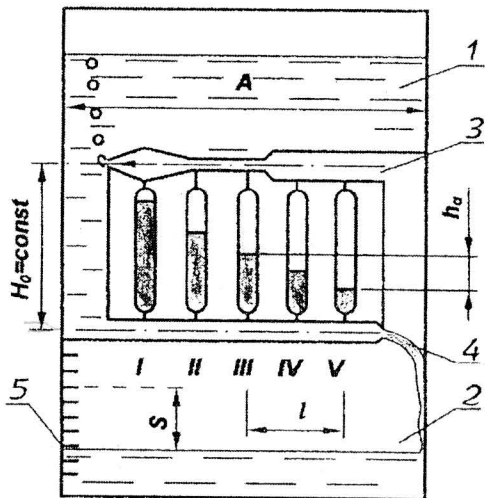


Рис. 6.1. Схема устройства № 4: 1,2 – баки; 3,4 – опытные каналы переменного и постоянного сечения; 5 – уровневая шкала; I-V – пьезометры

### 6.3. Порядок выполнения работы

1. При заполненном водой баке 2 (рис. 6.1) перевернуть устройство для получения течения в канале переменного сечения 3.

2. Снять показания пьезометров  $H_{п}=P/(\rho g)$  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 6.1.

Таблица 6.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначения, формулы	Сечения канала					
			I	II	III	IV	V	VI
1.	Площадь сечения канала, см <sup>2</sup>	$\omega$						
2.	Средняя скорость, см/с	$V = Q/\omega$						
3.	Пьезометрический напор, см	$H_{п}=P/(\rho g)$						
4.	Скоростной напор, см	$H_K=V^2/(2g)$						
5.	Полный напор, см	$H= P/(\rho g) + V^2/(2g)$		5,24	2,91	4,11	4,31	6,04

$A = 5$  см;  $B = 20$  см;  $S = 9$  см;  $t = 52$  с;  $Q = ABS / t = \dots$  см<sup>3</sup>/с

5. Вычертить в масштабе канал с пьезометрами (рис. 6.2). Соединив уровни жидкости в пьезометрах и 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  $P/(\rho g)$  и кинетической  $V^2/(2g)$  энергий жидкости вдоль потока; выяснить соответствие этих изменений уравнению Бернулли.

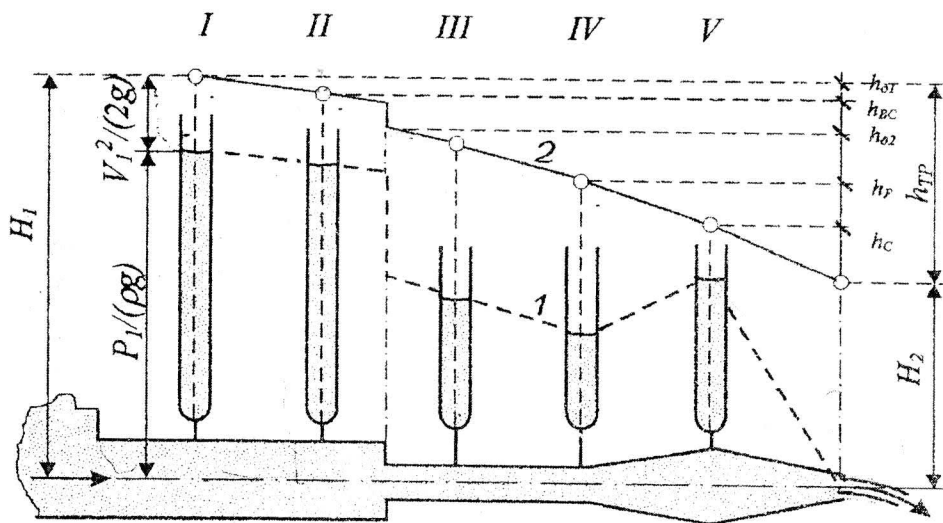


Рис. 6.2. Иллюстрация уравнения Бернулли:

1, 2 - пьезометрическая и напорная линии;  $H_1, H_2$  - полные напоры (механические энергии) на входе и выходе из канала;  $h_{тр}, h_{д1}, h_{д2}, h_{вс}, h_p, h_c$  - потери напора: суммарные, по длине на 1<sup>ом</sup> и 2<sup>ом</sup> участках, на внезапное сужение, на плавные расширения и сужения.

## 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.

### 7.1. Общие сведения

**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). В таких местах образуются циркуляционные зоны, на вращение 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.

### 7.2. Порядок выполнения работы

1. Перенести из табл.6.1 значения площадей сечений и скоростей в табл.7.1.
2. Определить опытные значения местных потерь  $h_M$  ( $h_{вс}, h_p$ ) из графика (см. рис. 6.2).
3. Найти расчетные значения местных потерь, сравнить их с опытными и объяснить расхождения.

Таблица 7.1

№ 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 <sup>2</sup>	$\omega$				
2.	Средние скорости за сопротивлением, см/с	$V_2$				
3.	Опытные значения местных потерь, см	$h_M (h_{BC}, h_p)$			-----	-----
4.	Коэффициенты местных сопротивлений	$\zeta_{BC} = 0.5(1 - \omega_2/\omega_1)$ $\zeta_{BP} = (\omega_2/\omega_1 - 1)^2$			-----	-----
5.	Расчетные значения местных потерь, см	$h_M = \zeta V_2^2 / (2g)$				

Примечание:  $\zeta_{BC}$ ,  $\zeta_{BP}$  - коэффициенты для внезапных сужения и расширения.

## РАБОТА 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА ПО ДЛИНЕ

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

### 8.1. Общие сведения

*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:

$$h_d = \lambda (l/d) V^2 / (2g),$$

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 на концах опытного участка канала, т.к. скоростной напор не изменяется по пути.

### 8.2. Порядок выполнения работы

1. При заполненном водой баке 1 поставить устройство № 4 на стол баком 2 (рис. 6.1).

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  $h_d$  по показаниям крайних пьезометров на нем (рис. 6.1.).

4. Найти число Рейнольдса и расчетное значение потерь напора  $h_d^*$  по порядку, указанному в табл. 8.1, и относи-

тельное расхождение опытного и расчетного значений потерь напора. Объяснить это расхождение.

Таблица 8.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначения, формулы	Значения величин
1	2	3	4
1.	Показания пьезометров, см	$P_1/(\rho g), \dots, P_2/(\rho g)$	...
2.	Длина участка с равномерным движением, см	$l$	4
3.	Опытное значение потерь напора по длине, см	$h_a = P_1/(\rho g) - P_2/(\rho g)$	
4.	Кинематический коэффициент вязкости воды, $\text{см}^2/\text{с}$	$\nu = 17.9/(1000+34T+0.22T^2)$	
5.	Число Рейнольдса	$Re = Vd/\nu$	
6.	Коэффициент трения при $Re < 2300$ $2300 < Re < 10d/\Delta$ $Re > 10d/\Delta$	$\lambda = 64/Re$ $\lambda = 0.316/Re^{0.25}$ $\lambda = 0.11(68/Re + \Delta/d)^{0.25}$	
7.	Расчетное значение потерь напора по длине, см	$h^*_a = \lambda(l/d) V^2/(2g)$	
8.	Относительное расхождение опытного и расчетного значений потерь	$\delta_h = (h_a - h^*_a)/h_a$	

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

Примечание. Абсолютную шероховатость стенок канала принять равной  $\Delta = 0.001 \text{ мм}.$

Handwritten notes and calculations on the right page:

нумер 4.5

$h_a = 0.039 \cdot \left(\frac{4}{0.5}\right) \frac{29.4^2}{2 \cdot 9.81}$

3,8 / 3,3 / 3 / 2,8 / 2,1 / 4,5 / 0,7

максимум  
напора  
 $R = \frac{\Delta T}{L}$