

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра гидравлики и гидропневмосистем**

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

по выполнению лабораторных работ на по учебной дисциплине

МДК.01.01 Элементы гидравлических приводов

по основной профессиональной образовательной программе

15.02.03 МОНТАЖ, ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО И ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Составитель: Хабарова Д.Ф., доцент кафедры гидравлики и гидропневмосистем
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

Челябинск, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

РАБОТА 1. ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ	4
РАБОТА 2. ИЗУЧЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ	10
РАБОТА 3. ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ	14
РАБОТА 4. ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ	15
РАБОТА 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ	17
РАБОТА 6. ИЛЛЮСТРАЦИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ	20
РАБОТА 7. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ	25
РАБОТА 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА ПО ДЛИНЕ	27
ПРИЛОЖЕНИЕ	32

Работа 1. ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ

Цель работы

Освоение техники измерения плотности, теплового расширения, вязкости и поверхностного натяжения капельных жидкостей

Общие сведения

В механике жидкости и газа объектом изучения является *жидкость* – физическое тело, обладающее текучестью, то есть способностью изменять свою форму под действием сколь угодно малых сил. Таким образом, в это понятие включают *капельные жидкости* и *газы*. Особенностью первых является то, что они ничтожно мало изменяют свой объем при изменении давления, поэтому их обычно считают *несжимаемыми*. Однако при рассмотрении отдельных вопросов, например, гидравлического удара, сжимаемость жидкости следует учитывать. Газы, наоборот, обладают большой сжимаемостью: под действием давления могут значительно уменьшаться в объеме, при уменьшении или отсутствии давления – неограниченно расширяться.

В данной работе будут рассмотрены некоторые механические характеристики и физические свойства *капельных жидкостей*, которые в дальнейшем будем называть просто *жидкостями*.

Таким образом, *жидкостью* называют малосжимаемое тело, изменяющее свою форму под действием сколь угодно малых сил.

Плотностью жидкости ρ (кг/м³) называют массу жидкости, заключенную в единице ее объема. Для однородной жидкости

$$\rho = \frac{m}{W}, \quad (1)$$

где m – масса жидкости, кг; W – объем, м³.

Жидкость может изменять свой объем под действием давления либо в результате изменения температуры. В первом случае это свойство жидкости называется *сжимаемостью*, во втором – *температурным расширением*.

Сжимаемость – это свойство жидкости изменять свой объем под действием давления. С количественной точки зрения это свойство оценивается *коэффициентом объемного сжатия* β_δ (1/Па), который представляет собой относительное изменение объема, приходящееся на единицу изменения давления:

$$\beta_\delta = -\left(\frac{\Delta W}{W}\right) / \Delta p, \quad (2)$$

где ΔW – изменение объема, м³; W – первоначальный объем, м³; Δp – изменение давления, Па.

Температурное расширение характеризуется **коэффициентом объемного расширения** β_t ($1/^\circ\text{C}$), который представляет собой относительное изменение объема при изменении температуры на 1 градус и постоянном давлении:

$$\beta_t = \left(\frac{\Delta W}{W} \right) / \Delta t, \quad (3)$$

где Δt – изменение температуры, $^\circ\text{C}$.

Вязкость представляет собой свойство жидкости сопротивляться сдвигу (скольжению) ее слоев (или частиц). Вязкость приводит к появлению сил внутреннего трения между смежными слоями жидкости, текущими с разными скоростями. Она характеризует степень текучести жидкости, подвижности ее частиц. С повышением давления вязкость жидкости увеличивается. Однако зависимость вязкости от давления существенна только при больших перепадах давления (десятки мегапаскалей). Во всех других случаях влияние давления на вязкость можно не учитывать. При увеличении температуры вязкость жидкости заметно уменьшается, а вязкость газов – растет. Если жидкость не движется, вязкость не проявляется. Поэтому при решении задач равновесия жидкостей её можно не принимать во внимание. При движении же жидкости необходимо учитывать силы трения, которые проявляются вследствие вязкости. Вязкость оценивают **динамическим коэффициентом вязкости** μ (Па·с), который представляет собой отношение касательного напряжения внутреннего трения τ при прямолинейном движении жидкости к градиенту скорости по нормали $\frac{dU}{dn}$, и **кинематическим коэффициентом вязкости** ($\text{м}^2/\text{с}$). Последний равен отношению динамического коэффициента вязкости μ к плотности жидкости ρ :

$$\nu = \mu / \rho. \quad (4)$$

Таким образом, вязкость зависит от рода жидкости и её температуры и не зависит от условий движения жидкости (не путать с **динамическим коэффициентом турбулентной вязкости!**).

Поверхностное натяжение – свойство жидкости образовывать поверхностный слой взаимно притягивающихся молекул – характеризуется **коэффициентом поверхностного натяжения** σ (Н/м), который равен энергии образования единицы площади межфазной поверхности.

Ниже в табл. 1 приведены значения ρ , β_δ , β_t , ν , σ для некоторых жидкостей при 20°C .

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Жидкость	ρ , кг/м ³	β_δ , МПа ⁻¹	β_t , °С ⁻¹	ν , м ² /с	σ , Н/м
Вода пресная	998	$0,49 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-6}$	$73 \cdot 10^{-3}$
Спирт этиловый	790	$0,78 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$1,52 \cdot 10^{-6}$	$23 \cdot 10^{-3}$
Масло:					
Автол М-8В	900	$0,60 \cdot 10^{-3}$	$0,64 \cdot 10^{-3}$	$300 \cdot 10^{-6}$	$25 \cdot 10^{-3}$
Индустриальное 20	900	$0,72 \cdot 10^{-3}$	$0,73 \cdot 10^{-3}$	$110 \cdot 10^{-6}$	$25 \cdot 10^{-3}$
Трансформаторное	890	$0,60 \cdot 10^{-3}$	$0,70 \cdot 10^{-3}$	$30 \cdot 10^{-6}$	$25 \cdot 10^{-3}$
АМГ-10	850	$0,76 \cdot 10^{-3}$	$0,83 \cdot 10^{-3}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$25 \cdot 10^{-3}$

Описание устройства № 1

Устройство для измерения параметров, характеризующих физические свойства и технические характеристики жидкости, а именно – **коэффициента объемного расширения, плотности жидкости, кинематического коэффициента вязкости, а также коэффициента поверхностного натяжения** – содержит пять приборов, выполненных в общем прозрачном корпусе (рис.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, ареометр 2 позволяет измерить плотность жидкости, вискозиметр Стокса 3 и капиллярный вискозиметр 4 – определить вязкость, а при помощи сталагмометра 5 определяют поверхностное натяжение жидкости.

1. Определение коэффициента объемного расширения

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

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

Порядок выполнения работы

1. Подсчитать общее число градусных делений Δt в шкале термометра и измерить расстояние ℓ (м) между крайними штрихами шкалы.

2. Вычислить приращение объема термометрической жидкости по следующей формуле:

$$\Delta W = \pi \cdot r^2 \cdot \ell, \quad (5)$$

где r – радиус капилляра термометра, м.

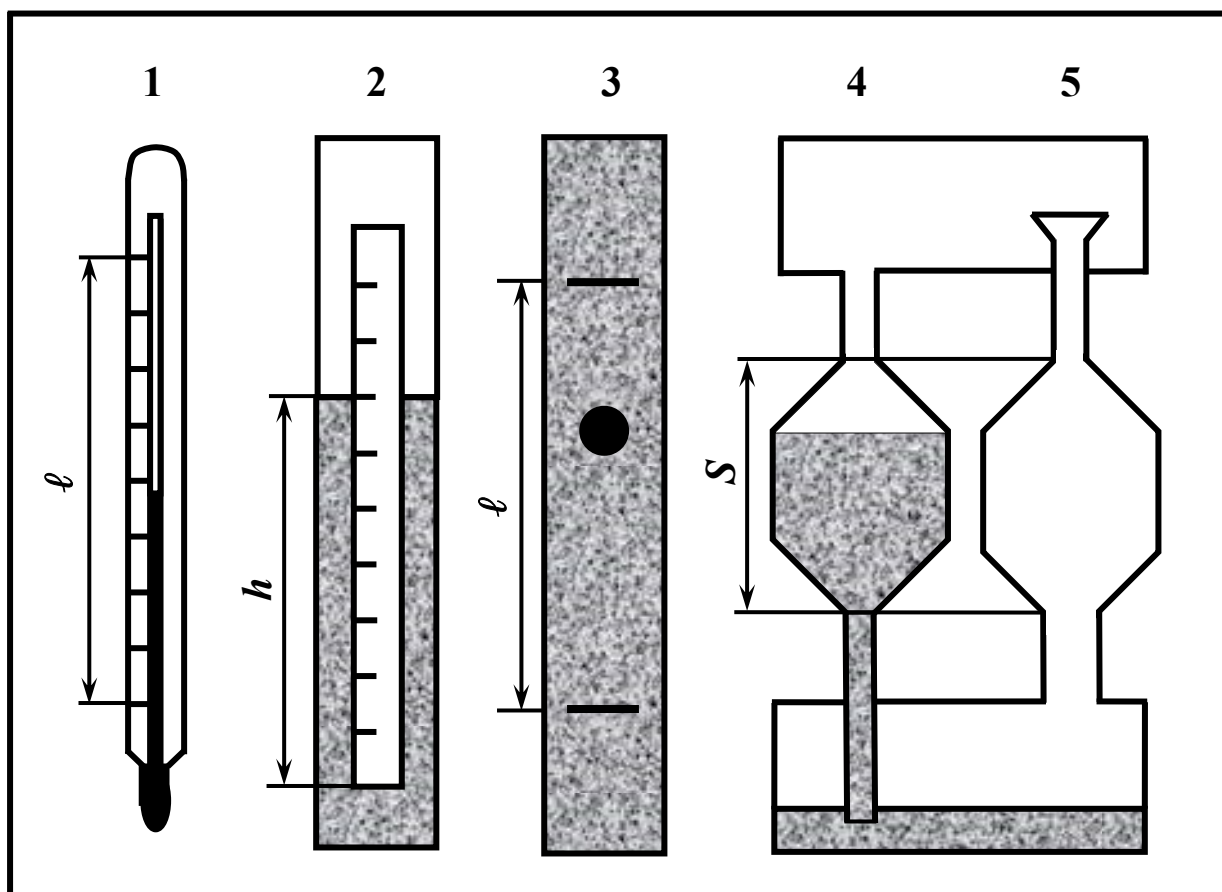


Рис. 1. Схема устройства № 1: 1 – термометр; 2 – ареометр; 3 – вискозиметр Стокса; 4 – капиллярный вискозиметр; 5 – сталагмометр

3. С учетом начального (при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) объема термометрической жидкости W найти значение коэффициента температурного расширения β_t по уравнению (3) и сравнить его со справочным значением β_t^* (см. табл. 1).

4. Занести значения используемых величин в табл. 1 (см. Приложение).

2. Измерение плотности жидкости при помощи ареометра

Ареометр 2 служит для определения плотности жидкости поплавковым методом. Он представляет собой пустотелый цилиндр с миллиметровой шкалой и грузом в нижней части (см. рис. 1). Благодаря грузу ареометр плавает в исследуемой жидкости в вертикальном положении. Глубина погружения ареометра h является мерой плотности жидкости и считывается со шкалы по верхнему краю мениска жидкости вокруг ареометра. В обычных ареометрах шкала отградуирована сразу по плотности.

Порядок выполнения работы

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

2. Вычислить плотность жидкости по формуле

$$\rho = 4 \cdot m / (\pi \cdot d^2 \cdot h), \quad (6)$$

где m – масса ареометра, кг; d – диаметр ареометра, м; h – глубина погружения ареометра, м.

Эта формула получена приравниванием силы тяжести ареометра $G = m \cdot g$ и выталкивающей (архимедовой) силы $P_{\text{арх}} = \rho \cdot g \cdot W$, где объем погруженной части ареометра $W = (\pi \cdot d^2 / 4) \cdot h$.

3. Сравнить опытное значение плотности ρ со справочным значением ρ^* (см. табл. 1).

4. Значения используемых величин свести в табл. 2 (см. Приложение).

3. Определение вязкости вискозиметром Стокса

Вискозиметр Стокса 3 достаточно прост и содержит цилиндрическую ёмкость, заполненную исследуемой жидкостью, и шарик (см. рис. 1). Прибор позволяет определить вязкость жидкости по времени падения шарика в ней следующим образом.

Порядок выполнения работы

1. Повернуть устройство № 1 в вертикальной плоскости на 180° и зафиксировать секундомером время τ 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 среднее арифметическое значение времени τ .

2. Вычислить опытное значение кинематического коэффициента вязкости жидкости по следующей зависимости:

$$\nu = g \cdot d^2 \cdot \tau \cdot (\rho_{\text{ш}} / \rho - 1) / [18 \cdot \ell + 43,2 \cdot \ell \cdot (d / D)], \quad (7)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; d и D – диаметры шарика и цилиндрической ёмкости соответственно, м; ρ и $\rho_{\text{ш}}$ – плотности жидкости и материала шарика соответственно, кг/м³.

3. Сравнить опытное значение кинематического коэффициента вязкости ν с табличным значением ν^* (см. табл. 1).

4. Значения используемых величин свести в табл. 3 (см. Приложение).

4. Измерение вязкости капиллярным вискозиметром

Капиллярный вискозиметр 4 включает ёмкость с капилляром (см. рис. 1). Вязкость определяется по времени истечения жидкости τ из ёмкости через капилляр.

Порядок выполнения работы

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

2. Вычислить значение кинематического коэффициента вязкости по следующей зависимости:

$$\nu = M \cdot \tau, \quad (10)$$

где M – постоянная прибора.

3. Сравнить опытное значение кинематического коэффициента вязкости ν с табличным значением ν^* (см. табл. 1).

4. Значения используемых величин свести в табл. 4 (см. Приложение).

5. Измерение поверхностного натяжения сталагмометром

Сталагмометр 5 служит для определения поверхностного натяжения жидкости методом отрыва капль. Он содержит ёмкость с капилляром, расширенным на конце для накопления жидкости в виде капли (см. рис. 1). Сила поверхностного натяжения в момент отрыва капль равна ее весу (силе тяжести), и поэтому определяется по плотности жидкости и числу капль, полученному при опорожнении ёмкости с заданным объемом.

Порядок выполнения работы

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 капель n .

2. Найти опытное значение коэффициента поверхностного натяжения по следующей зависимости:

$$\sigma = K \cdot \rho / n, \quad (11)$$

где K – постоянная сталагмометра.

3. Сравнить опытное значение коэффициента поверхностного натяжения σ с табличным значением σ^* (см. табл. 1).

4. Значения используемых величин свести в табл. 5 (см. Приложение).

Работа 2.

ИЗУЧЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Цель работы

Изучение устройства и принципа действия жидкостных приборов для измерения давления.

Общие сведения

Гидростатическим давлением называют нормальное напряжение сжатия в неподвижной жидкости, то есть силу, действующую на единицу площади поверхности, нормально ориентированной к этой силе.

За единицу давления в Международной системе единиц (СИ) принят паскаль (Па) – давление, вызываемое силой 1Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м^2 , то есть

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

Для практических вычислений и измерений эта единица может быть неудобна, поэтому чаще применяют кратные единицы – килопаскаль (кПа) и мегапаскаль (Мпа):

$$1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}; \quad 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}.$$

В настоящее время в технике продолжают применять систему единиц МКГСС, в которой за единицу давления принимается 1 кгс/см^2 . Используют также внесистемные единицы – техническую атмосферу и бар

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10^4 \text{ кгс/м}^2; \quad 1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 1,02 \text{ ат}.$$

В зависимости от способа отсчета различают *абсолютное, избыточное (манометрическое) и вакуумметрическое* давление.

Если жидкость находится в ненапряженном состоянии, то есть в ней отсутствуют напряжения сжатия, то давление равно нулю $p = 0$. Значения давления, отсчитанные от этого нуля, называют **абсолютным давлением** p_a .

Иногда давление удобно отсчитывать от условного нуля, за который принимается **атмосферное давление**, величина которого в какой-либо точке зависит от высоты этой точки над уровнем моря и незначительно колеблется в одной и той же точке. Нормальное атмосферное давление на уровне моря при температуре 0°C принимают равным $p_{am} = 101,3$ кПа, что отвечает давлению 760 мм рт. ст. (или 10330 мм вод. ст.). Приблизительно это давление можно принять равным $p_{am} \approx 100$ кПа = 10^5 Па. Таким образом, если давление отсчитывать от атмосферного давления, то его величина покажет избыток абсолютного давления над атмосферным. В этом случае давление называется **избыточным давлением** $p_{и}$:

$$p_{и} = p_a - p_{am}. \quad (1)$$

Избыточное давление отрицательно, если абсолютное давление p_a меньше атмосферного p_{am} . Недостаток давления до атмосферного называется **вакуумом** $p_{в}$:

$$p_{в} = -p_{и} = p_{am} - p_a. \quad (2)$$

На рис. 2 показано соотношение давлений в различных системах отсчета.

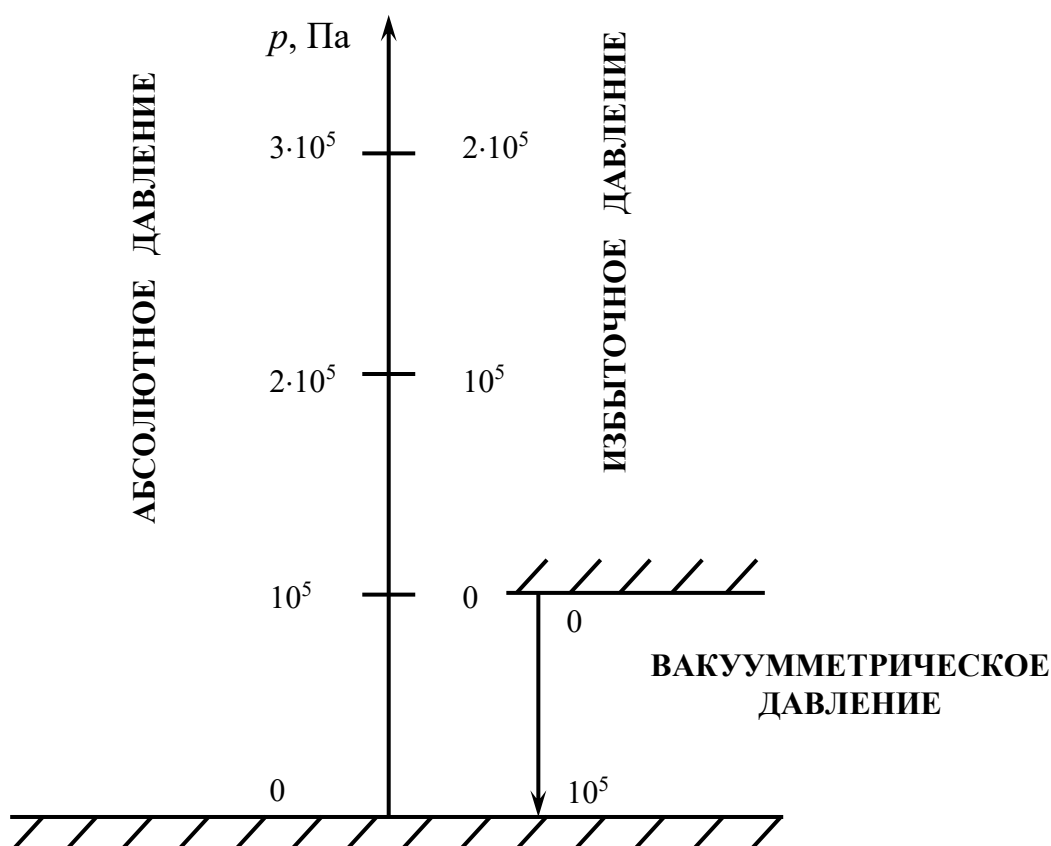


Рис. 2. Системы отсчета давлений

Приборы для измерения давления весьма разнообразны. Они классифицируются по различным признакам. По характеру измеряемой величины давления приборы разделяются на следующие группы:

- приборы для измерения атмосферного давления p_{atm} – **барометры**;
- приборы для измерения *разности абсолютного p_a и атмосферного давлений p_{atm}* , то есть для измерения *избыточного давления p_n* – **манометры** и *вакуума p_v* – **вакуумметры**. Приборы, измеряющие избыточное давление и вакуум называются **мановакуумметрами**;
- приборы для измерения абсолютного давления p_a – **манометры абсолютного давления** (если измеряемое давление больше атмосферного, то абсолютное давление можно измерять с помощью *барометра* и *манометра*; если меньше атмосферного – с помощью *барометра* и *вакуумметра*);
- приборы для измерения разности давлений – **дифференциальные манометры**;
- приборы для измерения малого избыточного давления и вакуума – **микроманометры**.

По принципу действия различают приборы жидкостные, механические, электрические, комбинированные.

К **жидкостным** относятся приборы, основанные на гидростатическом принципе действия, заключающемся в том, что измеряемое давление уравнивается давлением, создаваемым весом столба жидкости, высота которого h (м) служит мерой давления

$$p = \rho \cdot g \cdot h, \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Преимуществами жидкостных приборов являются простота конструкции и высокая точность, однако они удобны только при измерении небольших давлений.

В **механических** приборах измеряемое давление деформирует упругий элемент прибора – пружину, которая может представлять собой полую трубку, мембрану, сильфон и т.п. Деформация упругого элемента, вызванная давлением, по закону Гука пропорциональна давлению и служит его мерой. Преимуществом механических приборов является их компактность и большой диапазон измеряемых давлений.

В **электрических** приборах воспринимаемое чувствительным элементом давление преобразуется в электрический сигнал, который регистрируется показывающим (вольтметр, амперметр) или пишущим (самописец, осциллограф) приборами. Важным преимуществом этих приборов является то, что с их помощью можно фиксировать давление при быстротекущих процессах.

К **комбинированным** относятся приборы, принцип действия которых носит смешанный характер (например, электромеханические приборы).

Описание устройства № 2 и жидкостных приборов

Ртутный барометр состоит 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. 3. 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 $p_m = \rho \cdot g \cdot h_m$ на дне резервуара (см. рис. 3).

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 давления $p_{mo} = \rho \cdot g \cdot h_m$ м (см. рис. 3, а) или вакуумметрического давления $p_{vo} = \rho \cdot g \cdot h_v$ (см. рис. 3, б) над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 2. Давление в резервуаре можно изменять путем наклона устройства.

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

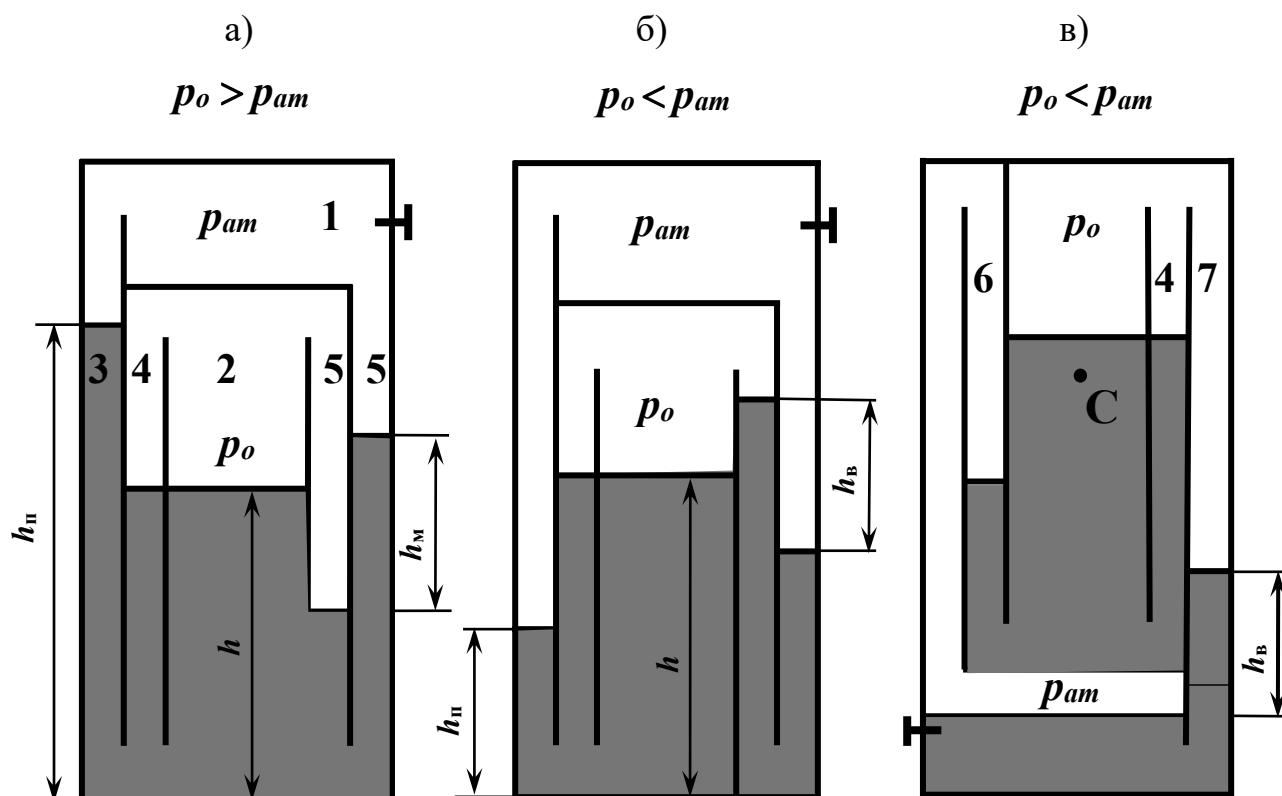


Рис. 3. Схема устройства № 2: 1 – полость с атмосферным давлением; 2 – опытный резервуар; 3 – пьезометр; 4 – уровнемер; 5 – мановакуумметр; 6 – пьезометр; 7 – вакуумметр

Работа 3. ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Цель работы

Приобретение навыков по измерению гидростатического давления жидкостными приборами

Общие сведения

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

$$p_a = p_0 + \rho \cdot g \cdot h, \quad (1)$$

где p_0 – абсолютное давление на свободной поверхности, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения м/с²; h – глубина погружения точки под свободной поверхностью, м.

При выполнении данной лабораторной работы необходимо вычислить давление в заданной точке (например, на дне резервуара) через показания различных приборов, а затем сравнить результаты, полученные двумя путями.

Порядок выполнения работы

1. В резервуаре 2 над жидкостью создать давление выше атмосферного ($p_0 > p_{am}$), о чем свидетельствует превышение уровня жидкости в пьезометре 3 над уровнем в резервуаре и прямой перепад уровней в мановакуумметре 5 (см. рис. 3, а). Для этого устройство поставить на правую сторону, а затем, повернув его против часовой стрелки, отлить часть жидкости из левого колена мановакуумметра 5 в резервуар 2.

2. Снять показания пьезометра $h_{п}$, уровнемера h и мановакуумметра $h_{м}$.

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 δ .

4. Над свободной поверхностью в резервуаре 2 создать вакуум ($p_0 < p_{am}$), когда уровень жидкости в пьезометре 3 становится ниже, чем в резервуаре, а на мановакуумметре 5 появляется обратный перепад $h_{в}$ (см. рис. 3, б). Для этого устройство поставить на левую сторону, а затем наклоном вправо перелить часть жидкости из резервуара 2 в левое колено мановакуумметра 5. Далее выполнить операции по пп. 2 и 3.

5. Перевернуть устройство против часовой стрелки (см. рис. 3, в) и определить манометрическое и 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.

6. Данные опытов занести в табл. 6 (см. Приложение).

7. Сделать выводы по данной работе.

Примечание. Принять атмосферное давление $p_{am} = 101\,325$ Па, плотность воды $\rho = 1000$ кг/м³.

РАБОТА 4. ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ

Цель работы

Наблюдение потоков жидкости с различной структурой и выявление факторов, влияющих на эту структуру.

Общие сведения

Различают два режима течения жидкости: *ламинарный* (слоистый) и *турбулентный* (вихревой).

При ламинарном режиме линии тока вполне определяются формой русла, по которому течет жидкость. Частицы жидкости движутся по параллельным траекториям, поперечные перемещения отсутствуют, поэтому поток имеет *слоистую структуру*. Ламинарное течение является вполне упорядоченным и при постоянном напоре – строго установившемся течением, хотя его нельзя назвать безвихревым: одновременно с поступательным движением имеет место вращательное движение отдельных частиц жидкости относительно своих мгновенных центров вращения.

При турбулентном режиме движение отдельных частиц жидкости подобно хаотическому, беспорядочному движению молекул газа, поэтому движение жидкости в целом носит также неупорядоченный характер. При турбулентном движении вектор скорости имеет не только осевые, но и нормальные к оси русла составляющие, поэтому наряду с основным продольным перемещением жидкости существуют поперечные перемещения и вращательные движения отдельных объемов жидкости, что приводит к интенсивному вихреобразованию потока в целом. Поперечное перемешивание жидкости обуславливает пульсации давления и скорости, при которых вышеназванные параметры в любой точке потока постоянно меняются во времени.

При резком изменении поперечного сечения или направления канала от его стенки отрывается *транзитная струя*. В кольцевом пространстве между транзитной струей и стенкой канала формируется зона интенсивного вихреобразования – *циркуляционная (вальцовая) зона*.

Для визуального наблюдения за характером течения применяют меченые частицы (например, частицы алюминия) или окрашенные (например, чернилами или тушью) струйки. При *установившемся* (стационарном) *течении* линия тока совпадает с траекторией частицы и не изменяет своей форме с течением времени, осредненные значения скорости и давления в каждой точке потока также постоянны во времени. В этом случае и расход, то есть количество жидкости, проходящее через заданное сечение в единицу времени, также не изменяется во времени.

Описание устройства № 3

Устройство № 3 имеет прозрачный корпус (рис. 4), баки 1 и 2 с успокоительной стенкой 3 для гашения возмущений в жидкости от падения струй и всплыва-

ния пузырей воздуха. Баки между собой соединены 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.

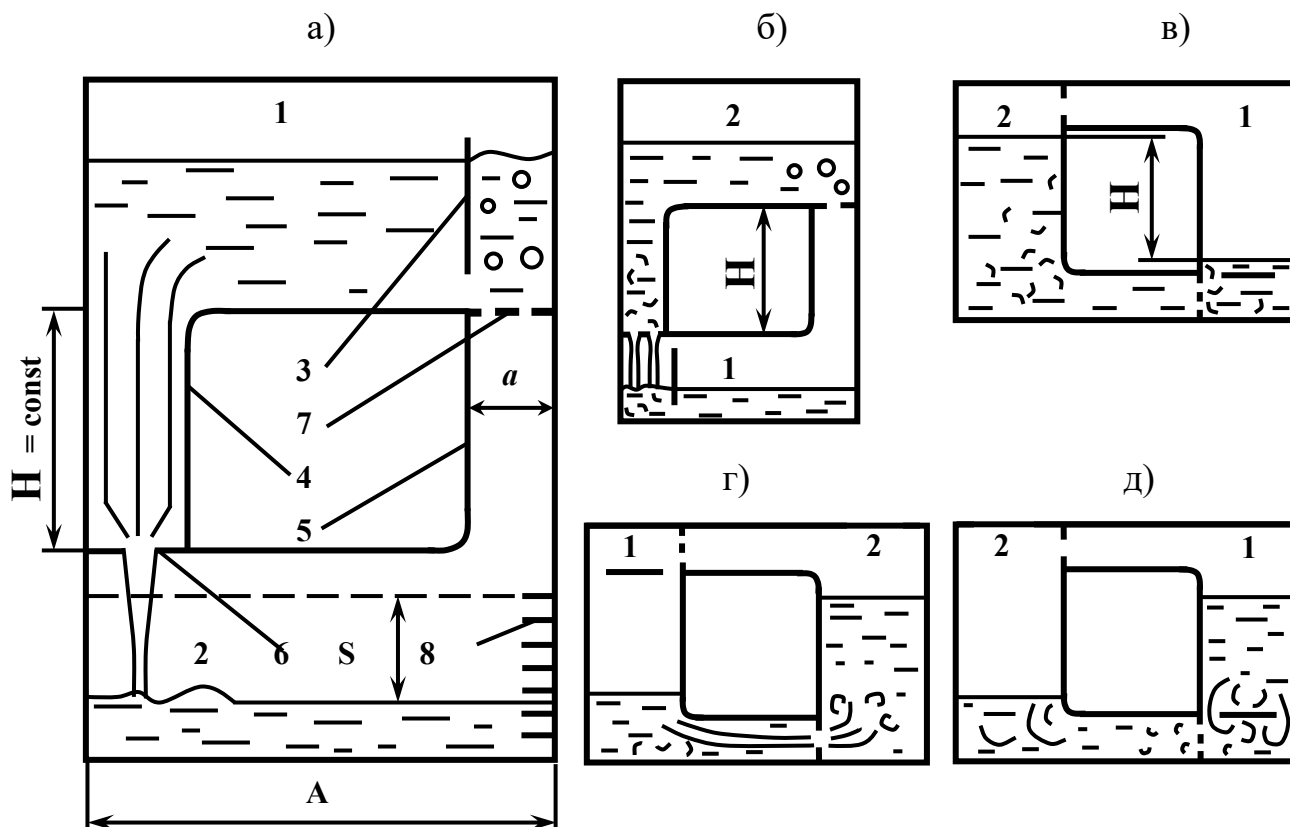


Рис. 4. Схема устройства № 3: 1, 2 – баки; 3 – перегородка; 4, 5 – опытные каналы; 6 – щель; 7 – решетка; 8 – уровнемерная шкала

Устройство работает следующим образом. В положениях устройства, изображенных на рис. 4, а, б, поступающая через левый канал в нижний бак вода вытесняет воздух в виде пузырей в верхний бак. Поэтому давление 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 течения благодаря низким скоростям течения из-за большого сопротивления щели 6. В свою очередь малое гидравлическое сопротивление решетки 7 обеспечивает турбулентный режим течения в канале 5 за счет больших скоростей (см. рис. 4, б). Расход можно уменьшать наклоном устройства от себя.

В случаях, указанных на рис. 4, 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.

Порядок выполнения работы

1. Создать в канале 4 ламинарный режим течения жидкости. Для этого при заполненном водой баке 1 поставить устройство баком 2 на стол (см. рис. 4, а). Провести визуальное наблюдение структуры потока.
2. Повернуть устройство в вертикальной плоскости по часовой стрелке на 180° (см. рис. 4, 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, в). Наблюдать в канале процесс перехода от турбулентного режима движения к ламинарному. Обратит внимание, что решетка приводит к турбулизации потока за ней.
4. При заполненном водой баке 2 поставить устройство так, чтобы канал 4 (со щелью) занял нижнее горизонтальное положение (см. рис. 4, г). Наблюдать за структурой потока в баке 2 при внезапном сужении, внезапном расширении в канале за щелью и при входе потока из канала в бак 1. Обратит внимание на циркуляционные (вальцовые) зоны, транзитную струю и связь скоростей с площадями сечений канала.
5. При заполненном баке 1 наблюдать структуру течения при обтекании перегородки (см. рис. 4, д).
6. Зарисовать структуры потоков для случаев, указанных в табл. 7 (см. Приложение).
7. Сделать выводы по данной работе.

РАБОТА 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Цель работы

1. Визуальное наблюдение ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости.
2. Освоение расчетного метода определения режима течения.

Общие сведения

Практическое исследование движения капельных и газообразных жидкостей показывает, что существуют два принципиально различных режима течения: ***ламинарный*** и ***турбулентный режимы***.

Существование двух резко отличных друг от друга режимов движения жидкости было открыто в 1839 и 1854 гг. немецким инженером-гидромехаником Г. Хагеном; английский физик О. Рейнольдс в 1883 г. опытным путем подтвердил этот факт.

Ламинарный режим (от латинского слова *lamina* – слой) характеризуется слоистым течением без перемешивания частиц жидкости и без пульсаций скоростей и давления. При данном режиме движения отсутствуют поперечные перемещения жидкости, линии тока вполне определяются границами русла, по которому течет жидкость. При постоянном напоре ламинарное течение является

упорядоченным, строго установившемся течением (в общем случае возможен неустановившийся режим течения). Ламинарное течение нельзя назвать безвихревым течением, так как наряду с поступательным движением имеет место вращательное движение отдельных частиц жидкости относительно мгновенных центров вращения с некоторыми угловыми скоростями, но отдельные вихри в ламинарном потоке гасятся силами вязкости.

Ламинарный режим движения встречается чаще всего в практике течения особенно вязких жидкостей (нефти, нефтепродуктов, битума, масел и т. п.), при низких скоростях течения в каналах незначительного поперечного сечения (движение воды через поры грунта, капилляры и т.п.).

Турбулентный режим (от латинского слова *turbulentus* – беспорядочный) характеризуется хаотическим, беспорядочным движением отдельных частиц жидкости, интенсивным вращением, вихреобразованием и поперечным перемешиванием, пульсациями во времени поля скоростей и поля давлений в любой точке пространства, занятого турбулентным потоком. В целом, при турбулентном режиме жидкость движется поступательно, вместе с тем, составляющие ее частицы имеют не только осевые, но и нормальные к оси русла составляющие вектора скорости, поэтому перемещения отдельных частиц жидкости представляют собой пространственные, неопределенно искривленные траектории.

Турбулентный режим движения в природе и технике встречается чаще ламинарного режима, так как на практике обычно имеются дополнительные условия, способствующие турбулизации потока, – неравномерность расхода, местные гидравлические сопротивления, вибрация и пр. Турбулентный режим течения наблюдается при движении маловязких жидкостей (бензина, керосина, спирта, кислоты и пр.), в большинстве случаев гидротехнической и гидромелиоративной практики (движение воды в трубах, каналах, реках и т.п.).

Критерием, позволяющим определять режим течения жидкости, является **число Рейнольдса Re** – это критерий гидродинамического подобия, который с физической точки зрения представляет собой **соотношение инерционных и вязкостных сил** и определяется следующим соотношением:

$$Re = \frac{V \cdot 4R}{\nu}, \quad (1)$$

где V – средняя скорость потока, м/с; $R = \omega / \Pi$ – гидравлический радиус – отношение площади живого сечения ω к смоченному периметру Π , м; ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м²/с.

Для труб круглого сечения диаметром d число Рейнольдса Re примет следующий вид:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}, \quad (2)$$

здесь d – внутренний диаметр трубопровода, м.

Смена одного режима течения жидкости другим происходит скачкообразно и обусловлена тем, что одно течение теряет устойчивость, другое – приобретает. В инженерной практике режим течения определяют путем сравнения числа Рей-

нольдса Re с его критическим значением $Re_{кр}$. Различают два значения этого числа: нижнее критическое число Рейнольдса $Re_{кр}^H$ и верхнее критическое число Рейнольдса $Re_{кр}^B$.

При числах Рейнольдса $Re < Re_{кр}^H$ ламинарное течение является вполне устойчивым: искусственная турбулизация потока и его возмущения гасятся влиянием сил вязкости, и ламинарный режим вновь восстанавливается.

При числах Рейнольдса $Re > Re_{кр}^B$ движение будет турбулентным.

При числах Рейнольдса $Re_{кр}^H < Re < Re_{кр}^B$ (в так называемой “переходной зоне” или “критической”) оба режима равновероятны: течение может быть либо ламинарным, либо турбулентным. Однако ламинарный режим в этом диапазоне изменения чисел Рейнольдса оказывается крайне неустойчивым: достаточно малейшего возмущения потока (например, толчка и пр.), и ламинарный режим “разрушается” и переходит в турбулентный. При практических расчетах полагают, что **в переходной зоне вероятнее турбулентный режим**.

Для большинства гидравлических систем, работающих в реальных условиях производства, устанавливают следующие общепринятые критические значения чисел Рейнольдса:

- нижнее критическое число Рейнольдса $Re_{кр}^H = 2300$;
- верхнее критическое число Рейнольдса $Re_{кр}^B = 4000$.

Порядок выполнения работы

1. Снять показания термометра t , °С, находящегося в устройстве № 1 (см. рис. 1) и определить кинематический коэффициент вязкости:

$$\nu = (17,9 \cdot 10^{-4}) / (1000 + 34 \cdot t + 0,22 \cdot t^2). \quad (3)$$

2. Создать в канале 4 течение жидкости при произвольном наклоне устройства № 3 от себя (см. рис. 4, а).

3. Измерить время τ (в секундах) перемещения уровня воды в баке на некоторое расстояние S .

4. По данным измерений определить:

а) расход жидкости

$$Q = \frac{A \cdot B \cdot S}{\tau}, \quad (4)$$

где числовые значения поперечного сечения бака A и B определить по табло на устройстве № 3;

б) среднюю скорость потока (значение площади сечения ω , а также диаметра d для дальнейших расчетов также определить по табло на устройстве № 3)

$$V = \frac{Q}{\omega}; \quad (5)$$

в) число Рейнольдса Re по уравнению (2).

5. Повернуть устройство № 3 в его плоскости на 180° (см. рис. 4, б) и повторить опыт по пп. 3...5.

6. Данные опытов занести в табл. 8 (см. Приложение).

7. Сделать выводы по данной работе.

РАБОТА 6. ИЛЛЮСТРАЦИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Цель работы

1. Опытное подтверждение выводов, следующих из уравнения Бернулли, то есть снижение механической энергии вдоль потока, а также перехода потенциальной энергии в кинетическую и обратно.
2. Построение на основании опытных данных пьезометрической и напорной линий, иллюстрирующих изменение удельной потенциальной и полной удельной механической энергии вдоль потока соответственно.

Общие сведения

Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости имеет вид:

$$z + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{U^2}{2 \cdot g} = \text{const}, \quad (1)$$

где z – геометрический напор (высота нормального сечения струйки относительно плоскости сравнения), м; $\frac{P}{\rho \cdot g}$ – пьезометрический напор, м (P – давление в этом сечении), м; $\frac{U^2}{2 \cdot g}$ – скоростной напор (U – скорость в этом сечении), м.

Назовем *удельной механической энергией* механическую энергию, отнесенную к единице веса жидкости. Эта удельная механическая энергия называется *напором*. Очевидно, что единица измерения напора – метр (Дж / Н = м).

Геометрическим напором z называется удельная потенциальная энергия положения жидкости.

Пьезометрическим напором $\frac{P}{\rho \cdot g}$ называется удельная потенциальная энергия давления жидкости.

Гидростатическим напором $z + \frac{P}{\rho \cdot g}$ называется удельная потенциальная энергия жидкости.

Скоростным напором $\frac{U^2}{2 \cdot g}$ называется удельная кинетическая энергия жидкости.

Полным напором $z + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{U^2}{2 \cdot g}$ называется полная (кинетическая и потенциальная) удельная механическая энергия жидкости.

С физической точки зрения уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости выражает **закон сохранения механической энергии**.

Таким образом, полная удельная механическая энергия жидкости постоянна вдоль струйки, но ее составляющие части – кинетическая и потенциальная энергии – могут изменяться. Характер этих изменений вполне определяется геометрическими параметрами струйки.

При переходе от элементарной струйки идеальной жидкости к потоку реальной вязкой жидкости необходимо учитывать потери энергии, обусловленные различными гидравлическими сопротивлениями, а также неравномерный характер распределения поля скоростей и давлений по живому сечению потока. Для расчетного участка плавно изменяющегося течения реальной жидкости, ограниченного живыми сечениями 1 и 2, уравнение Бернулли примет следующий вид:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2 \cdot g} + \Delta h_{1-2}, \quad (2)$$

где V_1 и V_2 – средние скорости потока в сечениях 1 и 2 соответственно, м/с; Δh_{1-2} – потери удельной энергии на расчетном участке между сечениями 1 и 2, м; α_1 и α_2 – коэффициенты кинетической энергии (коэффициенты Кориолиса) в сечениях 1 и 2 соответственно.

Коэффициент кинетической энергии (коэффициент Кориолиса) α , учитывающий неравномерность поля скоростей по живому сечению, представляет собой отношение действительного значения кинетической энергии, пронесимой потоком жидкости через живое сечение за некоторый отрезок времени, к значению кинетической энергии, определенной для того же отрезка времени при условии, что движение частиц жидкости происходит со средней для данного сечения скоростью

$$\alpha = \frac{1}{\omega} \int_{\omega} \left(\frac{U}{V} \right)^3 d\omega. \quad (3)$$

Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости является **уравнением баланса энергии** с учетом потерь. Энергия, теряемая жидкостью, не исчезает бесследно, а превращается в другую форму – *тепловую*.

Графической иллюстрацией этих изменений является **напорная линия** (н. л.).

Напорная линия – это график изменения (в случае идеальной жидкости – сохранения) *полной удельной механической энергии* вдоль потока (струйки).

Из уравнения неразрывности для элементарной струйки

$$U \cdot d\omega = \text{const}, \quad (4)$$

или для потока реальной несжимаемой жидкости

$$V \cdot \omega = \text{const}, \quad (5)$$

следует, что скорость (следовательно, удельная кинетическая энергия) изменятся обратно пропорционально площади живого сечения ($d\omega$ или ω): увеличивается на суживающихся участках, уменьшается на расширяющихся участках и остается постоянной на участках с постоянным сечением. Изменение кинетической энергии приводит к изменению потенциальной энергии: увеличение кинетической

энергии сопровождается уменьшением потенциальной и наоборот. Характер этих изменений иллюстрирует *пьезометрическая линия* (пъез. л.).

Пьезометрическая линия – это график изменения *гидростатического напора* вдоль потока (струи).

Описание устройства № 4

Устройства № 4 содержит баки 1 и 2, сообщаемые через опытные каналы переменного № и постоянного 4 сечений (рис. 5). 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.

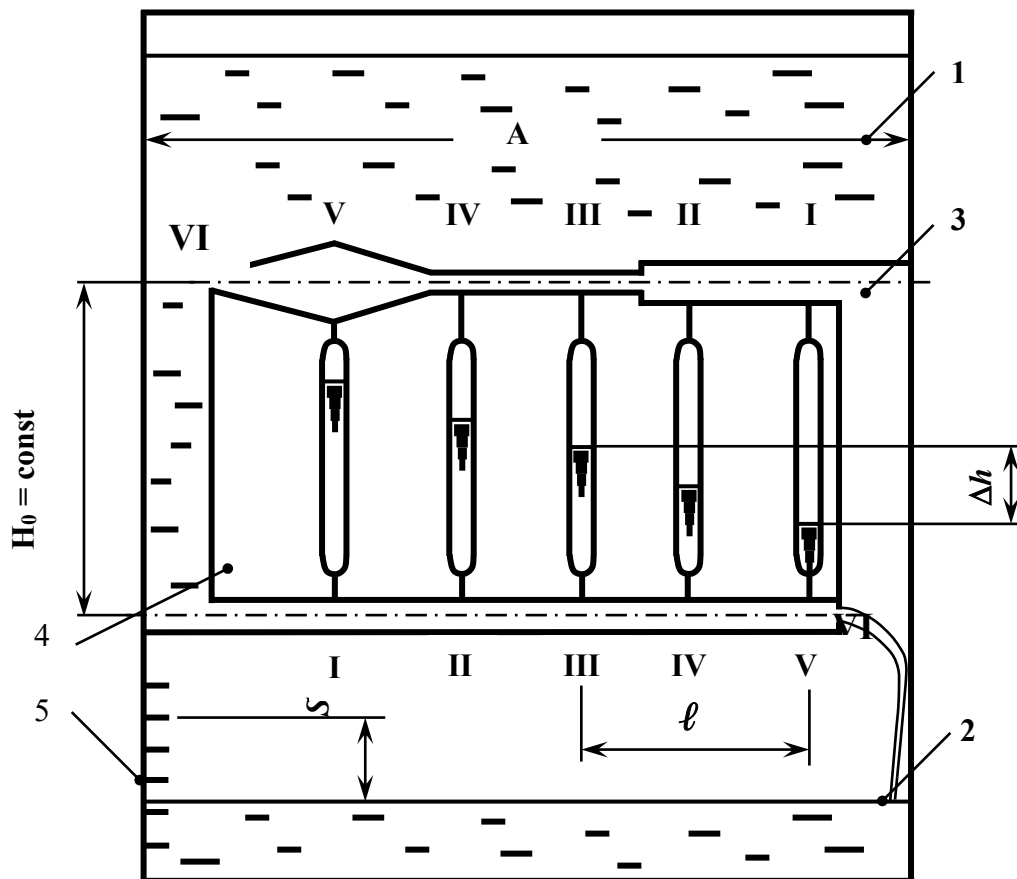


Рис. 5. Схема устройства № 4: 1, 2 – баки; 3, 4 – опытные каналы переменного и постоянного сечений; 5 – уровневая шкала; I – V – пьезометры

Порядок выполнения работы

1. Заполнив водой бак 1 (см. рис. 5), перевернуть устройство для получения течения в канале постоянного сечения 4.

2. Снять показания пьезометров $H_{\Pi} = \frac{P}{\rho \cdot g}$ по нижним положениям менисков воды в них для пяти сечений I ... V, пьезометрический напор в шестом сечении равен нулю, то есть $\frac{P_{VI}}{\rho \cdot g} = 0$.

3. Измерить время τ (в секундах) перемещения уровня воды в баке на произвольно заданную величину S .

4. По данным измерений определить:

а) расход жидкости

$$Q = \frac{A \cdot B \cdot S}{\tau}, \quad (5)$$

числовые значения поперечного сечения бака A и B определить по табло на устройстве № 4;

б) среднюю скорость потока в сечениях I ... VI (значения площадей сечений ω приведены на табло устройства № 4)

$$V = \frac{Q}{\omega}; \quad (6)$$

в) скоростные напоры $H_{\kappa} = \frac{\alpha \cdot V^2}{2 \cdot g}$ в сечениях I...VI, приняв коэффициент кинетической энергии $\alpha_1 \dots \alpha_{VI} \approx 1$;

г) полные напоры $H = H_{\Pi} + H_{\kappa} = z + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha \cdot V^2}{2g}$ в сечениях канала I...VI, совместив плоскость сравнения с осевой линией потока (таким образом, $z_1 \dots z_{VI} = 0$).

5. Данные опытов занести в табл. 9 (см. Приложение).

6. Построить для данного канала *пьезометрическую линию*. Для этого, обозначив контуры канала, отложить в масштабе от его осевой линии (плоскости сравнения) для сечений I...VI пьезометрические напоры $H_{\Pi} = \frac{P}{\rho \cdot g}$. Соединив край-

ние точки, получить пьезометрическую линию, иллюстрирующую изменение потенциальной энергии (гидростатического напора) вдоль потока (рис. 6, кривая 1).

7. На том же рисунке построить *напорную линию*. Для этого в масштабе отложить для каждого сечения I ... VI от пьезометрической линии скоростные напоры

$$H_{\kappa} = \frac{\alpha \cdot V^2}{2 \cdot g} \quad (\text{или от осевой линии потока – полные напоры } H = z + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha \cdot V^2}{2 \cdot g})$$

и соединить полученные точки (см. рис. 6, кривая 2).

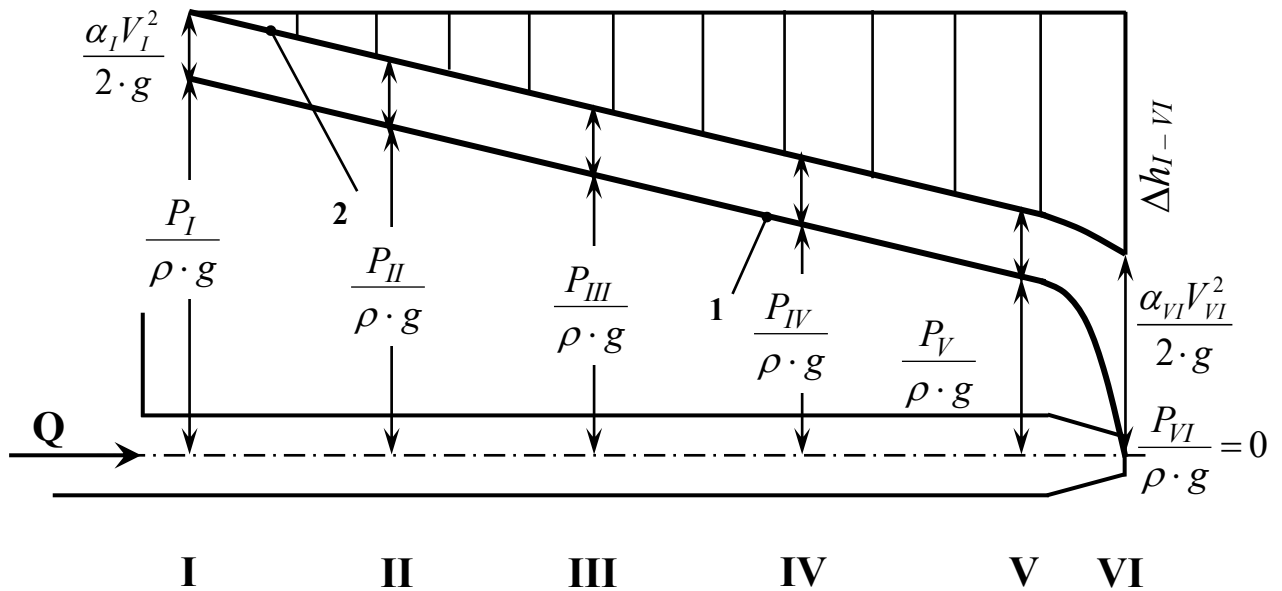


Рис. 6. Построение напорных линий для канала постоянного сечения

8. Заполнив водой бак 2 (см. рис. 5) и перевернув устройство для получения течения в канале переменного сечения 3, повторить опыт по пп. 2...7. *Пьезометрическая и напорная линии* для данного канала показаны на рис. 7 кривой 1 и 2 соответственно.

9. Сделать выводы по данной работе.

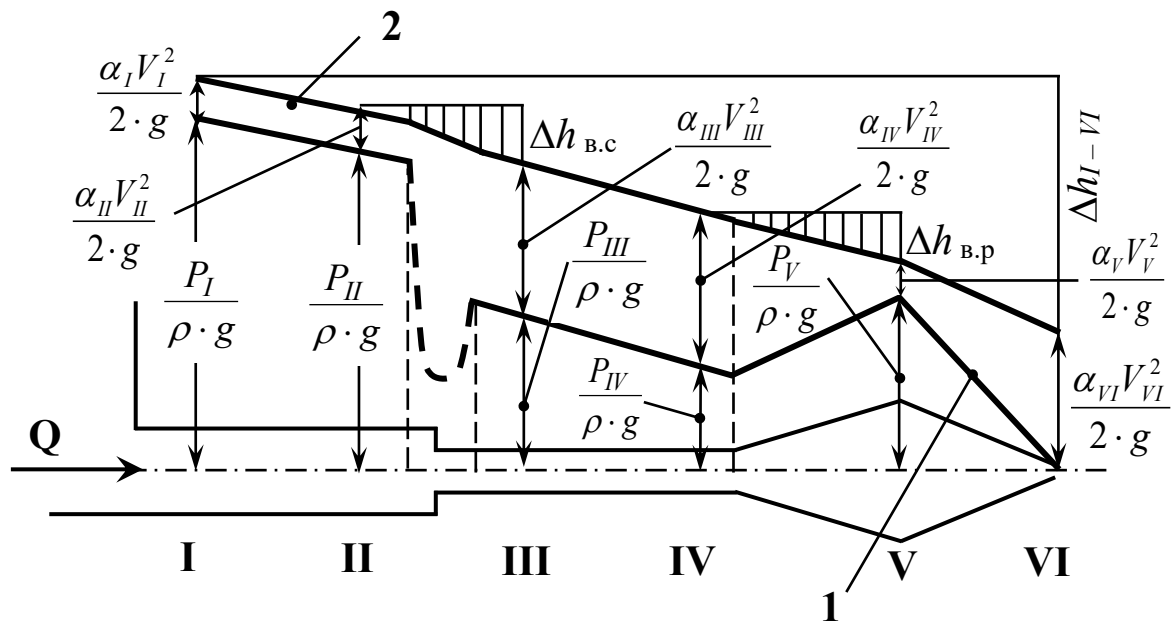


Рис. 7. Построение напорных линий для канала переменного сечения

РАБОТА 7. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Цель работы

1. Освоение методики опытного определения потерь напора в местных гидравлических сопротивлениях.
2. Проведение сравнительного анализа потерь напора в местных сопротивлениях, полученных опытным путем, с потерями напора, рассчитанными по формуле Вейсбаха при использовании инженерных зависимостей для коэффициентов местных сопротивлений. Вычисление относительного расхождения опытного и расчетного значений потерь напора в местных гидравлических сопротивлениях.

Общие сведения

Местные изменения размеров или конфигурации русла на различных фасонных участках (внезапное или плавное расширение (сужение), вентили, задвижки, клапаны, колена, арматура и т.п.) вызывают деформацию и изменение скорости потока. При прохождении жидкости через фасонные участки происходит отрыв транзитного потока от стенок русла, образуются циркуляционные зоны, на вращение жидкости в которых затрачивается часть механической энергии потока.

Гидравлические сопротивления фасонных участков называются **местными сопротивлениями**, потери механической энергии в этих местных сопротивлениях называются **местными потерями энергии**.

Потери напора в местных гидравлических сопротивлениях с физической точки зрения обусловлены инерционно-вязкостным взаимодействием жидкости со стенками фасонных участков русла и могут быть определены по формуле Вейсбаха:

$$\Delta h_m = \zeta \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (1)$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления; V – средняя по сечению скорость, м/с.

Если скорость в местном гидравлическом сопротивлении изменяется по длине, то за расчетную скорость принято принимать бóльшую из скоростей.

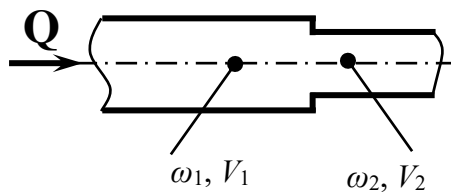
Сложный характер взаимодействия потока жидкости с местными гидравлическими сопротивлениями не позволяет, как правило, установить аналитические зависимости для определения коэффициентов местных сопротивлений ζ . Для большинства местных сопротивлений коэффициенты ζ определяются опытным путем. В общем случае, как показывают расчеты и данные опытов, коэффициенты ζ зависят от геометрии фасонного участка трубы или канала и от состояния потока. При этом влияние числа Рейнольдса Re на коэффициенты многих местных сопротивлений ограничивается, как правило, областью ламинарного течения жидкости. При турбулентном течении коэффициенты местных сопротивлений ζ определяются в основном формой местных сопротивлений и геометрическими параметрами.

ми и не зависят от числа Рейнольдса, что означает квадратичный закон сопротивления или автомодельность.

Величина местных потерь напора *экспериментально* определяется разностью полных напоров жидкости до и после местного сопротивления. При этом коэффициент местного сопротивления ζ определяется отношением местных потерь напора к скоростному напору, то есть

$$\zeta = \Delta h_m / \frac{V^2}{2 \cdot g}. \quad (2)$$

При *расчетном* определении потерь напора по формуле Вейсбаха (1) коэффициент местного сопротивления *при внезапном сужении русла* может быть определен по полуэмпирической формуле Идельчика:

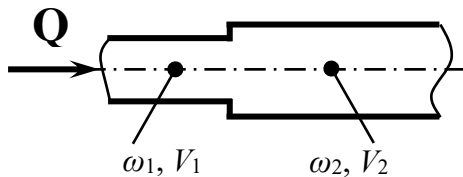


$$\zeta_{в.с} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \right). \quad (3)$$

Рис. 8. Внезапное сужение русла

При определении потерь напора при внезапном сужении потока $\Delta h_{в.с}$ необходимо коэффициент $\zeta_{в.с}$ умножить на бóльший скоростной напор, то есть на $V_2/2 \cdot g$.

Коэффициент местного сопротивления *при внезапном расширении русла* может быть определен по следующей аналитической зависимости:



$$\zeta_{в.р} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2. \quad (4)$$

Рис. 9. Внезапное расширение русла

При определении потерь напора при внезапном расширении потока $\Delta h_{в.р}$ необходимо коэффициент $\zeta_{в.р}$ умножить на бóльший скоростной напор, то есть на $V_1/2 \cdot g$.

Порядок выполнения работы

1. Перенести из табл. 9 лабораторной работы № 6 (см. Приложение) данные канала переменного сечения: значения площадей сечений II и III (внезапное сужение) и полных напоров в этих сечениях; значения площадей сечений IV и V

(внезапное расширение) и полных напоров в этих сечениях, а также скоростных напоров в сечениях III и IV (при этом $\frac{V_{III}^2}{2 \cdot g} = \frac{V_{IV}^2}{2 \cdot g}$) в табл. 10 (см. Приложение).

2. Определить опытные значения местных потерь при внезапном сужении потока $\Delta h_{в,с}$ как разность полных напоров сечений II и III соответственно.

3. Определить *опытные* значения местных потерь при внезапном расширении потока $\Delta h_{в,р}$ как разность полных напоров сечений IV и V соответственно.

4. Найти *расчетные* значения местных потерь при внезапном сужении $\Delta h_{в,с}^*$ и внезапном расширении $\Delta h_{в,р}^*$ потока, используя формулу Вейсбаха (1), также формулы (3) и (4) для определения коэффициентов местных сопротивлений при внезапном сужении и расширении русла соответственно.

5. Определить относительное расхождение δ опытного и расчетного значений потерь напора при внезапном сужении и расширении русла.

6. Сделать выводы по лабораторной работе.

РАБОТА 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА ПО ДЛИНЕ

Цель работы

1. Освоение экспериментального и расчетного методов определения потерь напора на трение по длине.

2. Проведение сравнительного анализа потерь напора по длине, полученных экспериментальным методом, с потерями напора, рассчитанными по формуле Дарси-Вейсбаха при использовании расчетных зависимостей для коэффициента гидравлического трения. Вычисление относительного расхождения экспериментального и расчетного значений потерь напора по длине.

Общие сведения

В случае установившегося движения жидкости при равномерном её течении эпюра скорости в поперечном сечении не изменяется вдоль потока. Возникающие при этом потери энергии на прямых участках трубопроводов и каналов с постоянными по длине сечениями называются *потерями по длине*, а гидравлическое сопротивление, вызывающее эти потери, – сопротивлением по длине. Таким образом, *сопротивлением по длине* называется сопротивление прямых участков трубопроводов и каналов с постоянными по длине сечениями при равномерном движении жидкости.

Потери по длине обусловлены внутренним трением в жидкости, поэтому имеют место не только в шероховатых, но и в гладких трубах и каналах. Физической причиной гидравлического трения является вязкость и инерционность жидкости. Таким образом, потери по длине обусловлены

инерционно-вязкостными свойствами жидкости и шероховатостью стенок каналов и могут быть определены по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$\Delta h_{\text{тр}} = \zeta_{\text{тр}} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (1)$$

где $\zeta_{\text{тр}}$ – коэффициент сопротивления трения; $\frac{V^2}{2 \cdot g}$ – скоростной напор, рассчитанный по средней скорости V .

Коэффициент сопротивления трения $\zeta_{\text{тр}}$ зависит от размеров трубопроводов: возрастает с увеличением длины ℓ и уменьшается с увеличением поперечного сечения канала (диаметра d или гидравлического радиуса R , где $R = \omega / \Pi$ – отношение площади живого сечения ω к смоченному периметру Π):

$$\zeta_{\text{тр}} = \lambda \frac{\ell}{d} \text{ – для круглых труб и каналов,} \quad (2)$$

$$\zeta_{\text{тр}} = \lambda \frac{\ell}{4R} \text{ – для остальных труб.} \quad (3)$$

Здесь λ – коэффициент гидравлического трения, который зависит от числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости стенок трубы или канала k , то есть

$$\lambda = f(Re, k). \quad (4)$$

Число Рейнольдса для круглых труб и каналов

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}, \quad (5)$$

для каналов и труб произвольного сечения

$$Re = \frac{V \cdot 4R}{\nu}, \quad (6)$$

здесь ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

Относительная шероховатость k представляет собой отношение абсолютной эквивалентной шероховатости Δ к диаметру d , то есть

$$k = \Delta / d. \quad (7)$$

По числу Рейнольдса вся область сопротивления разбита на пять зон.

I зона ($Re \leq 2000$) – зона ламинарного режима течения.

При ламинарном движении коэффициент гидравлического трения λ практически не зависит от шероховатости, являясь функцией только числа Рейнольдса, то есть $\lambda_{\text{I}} = f(Re)$, и определяется формулой Пуазейля:

$$\lambda_{\text{I}} = \frac{64}{Re}. \quad (8)$$

II зона ($2000 < Re < 4000$) – зона перемежаемости ламинарного и турбулентного режимов течения.

При данном режиме течения коэффициент гидравлического трения λ также не зависит от шероховатости, а зависит, как и в предыдущем случае, только от числа Рейнольдса, то есть $\lambda_{\text{II}} = f(Re)$. С увеличением числа Рейнольдса Re относительная

продолжительность существования турбулентного режима растёт, ламинарного – уменьшается. В этой зоне коэффициент гидравлического трения

$$\lambda_{II} = (1 - \chi) \cdot \lambda_I + \chi \cdot \lambda_{III}, \quad (9)$$

где коэффициент χ определяется следующей зависимостью:

$$\chi = \sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{Re}{2000} - 1 \right) \right] \quad (10)$$

III зона $\left(4000 \leq Re \leq \frac{15}{k} \right)$ – зона “гладкостенного” сопротивления.

В зоне “гладкостенного” сопротивления коэффициент гидравлического трения λ зависит только от числа Рейнольдса, то есть $\lambda_{III} = f(Re)$.

Если $Re < 10^5$ коэффициент гидравлического трения λ может быть определен по формуле Блазиуса:

$$\lambda_{III} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}. \quad (11)$$

Если $Re > 10^5$ коэффициент гидравлического трения λ может быть определен по формуле Филоненко и Альтшуля:

$$\frac{1}{\lambda_{III}} = 1,8 \cdot \lg Re - 1,64. \quad (12)$$

IV зона $\left(\frac{15}{k} < Re < \frac{560}{k} \right)$ – переходная зона.

В этой зоне коэффициент гидравлического трения λ зависит как от числа Рейнольдса, так и от шероховатости, то есть $\lambda_{IV} = f(Re, k)$ и может быть определен по формуле Кольбрука:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{IV}}} = -2 \cdot \lg \left(\frac{k}{3,7} + \frac{2,51}{Ra \sqrt{\lambda_{IV}}} \right). \quad (13)$$

V зона $\left(Re \geq \frac{560}{k} \right)$ – зона “квадратичного” сопротивления.

В зоне “квадратичного” сопротивления коэффициент гидравлического трения λ вполне определяется шероховатостью стенок канала или труб, то есть $\lambda_V = f(k)$. Для определения коэффициента гидравлического трения λ в этой зоне можно, например, воспользоваться формулой Никурадзе и Прандтля:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_V}} = -2 \cdot \lg \left(\frac{k}{3,7} \right), \quad (14)$$

либо формулой Шифринсона

$$\lambda_V = 0,11 \cdot (k)^{0,25}. \quad (15)$$

Для определения коэффициента гидравлического трения λ **в турбулентной области течения** можно использовать универсальную формулу Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(k + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} . \quad (16)$$

На рис. 10 показана зависимость коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса Re во всей области сопротивления.

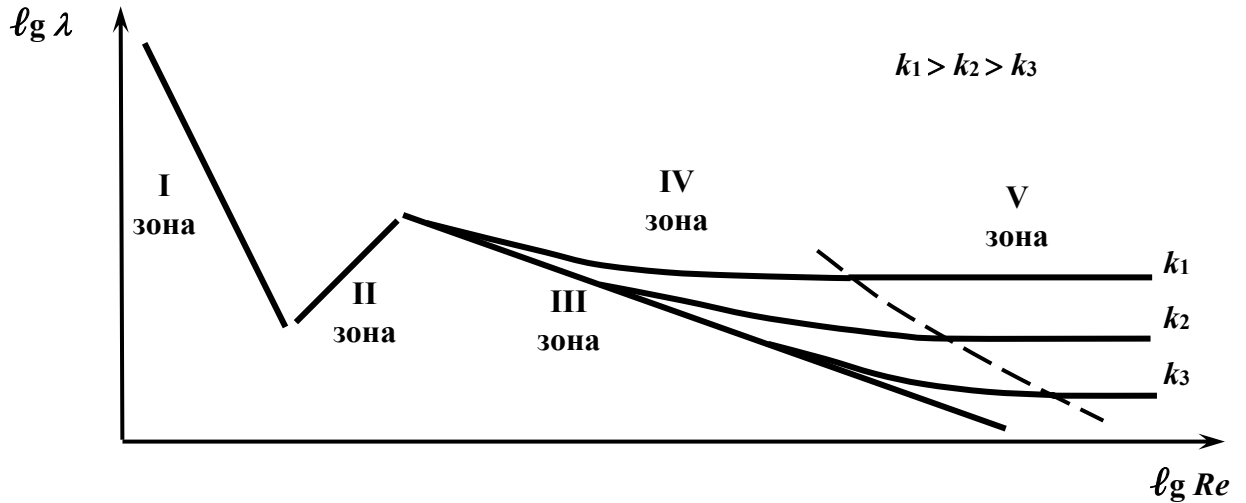


Рис. 10. График изменения коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса Re

Таким образом, объединив зависимости (1) – (3), получим:

$$\Delta h_{\text{тр}} = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad \text{— для круглых труб и каналов,} \quad (17)$$

$$\Delta h_{\text{тр}} = \lambda \frac{\ell}{4R} \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad \text{— для труб и каналов любого профиля.} \quad (18)$$

Порядок выполнения работы

1. Перенести из табл. № 9 лабораторной работы № 6 в табл. 11 (см. Приложение) следующие данные канала постоянного сечения: значения пьезометрических напоров сечений III и V ($\frac{P_{\text{III}}}{\rho \cdot g}$ и $\frac{P_{\text{V}}}{\rho \cdot g}$); значение средней скорости ($V_{\text{III}} = V_{\text{V}}$) и скоростного напора $\frac{\alpha_{\text{III}} \cdot V_{\text{III}}^2}{2g} = \frac{\alpha_{\text{V}} \cdot V_{\text{V}}^2}{2g}$, а также кинематического коэффициента

вязкости ν . Либо снять показания пьезометров в вышеназванных сечениях ($\frac{P_{\text{III}}}{\rho \cdot g}$ и $\frac{P_{\text{V}}}{\rho \cdot g}$). Измерить время τ (в секундах) перемещения уровня воды в баке на произвольно заданную величину S и температуру в помещении t в $^{\circ}\text{C}$ с целью дальнейшего определения:

– средней скорости V течения воды в канале постоянного сечения

$$V_{\text{III}} = V_{\text{V}} = \frac{A \cdot B \cdot S}{\tau \cdot \omega}; \quad (19)$$

– скоростного напора

$$\frac{\alpha_{\text{III}} \cdot V_{\text{III}}^2}{2 \cdot g} = \frac{\alpha_{\text{V}} \cdot V_{\text{V}}^2}{2 \cdot g}; \quad (20)$$

– кинематического коэффициента вязкости воды ν

$$\nu = (17,9 \cdot 10^{-4}) / (1000 + 34 \cdot t + 0,22 \cdot t^2). \quad (21)$$

Числовые значения поперечного сечения бака A и B , а также площади канала постоянного сечения ω определить по табло на устройстве № 4.

2. Определить *опытное* значение потерь напора на трение по длине $\Delta h_{\text{аэ}}$ как разность пьезометрических напоров (показаний пьезометров) в сечениях III и V, то есть

$$\Delta h_{\text{дл}} = \frac{P_{\text{III}}}{\rho \cdot g} - \frac{P_{\text{V}}}{\rho \cdot g}. \quad (22)$$

3. Измерить длину ℓ между сечениями III и V.

4. Вычислить число Рейнольдса Re по уравнению (5), предварительно определив диаметр сечения d по площади канала ω , и относительную шероховатость k по формуле (7), приняв абсолютную шероховатость стенок канала $\Delta = 0,001$ мм.

5. Определив зону сопротивления, вычислить коэффициент гидравлического трения λ по формуле, соответствующей данной зоне сопротивления.

6. Найти *расчетное* значение потерь напора на трение $\Delta h_{\text{дл}}^*$ по формуле (17).

5. Определить относительное расхождение δ опытного $\Delta h_{\text{дл}}$ и расчетного $\Delta h_{\text{дл}}^*$ значений потерь напора на трение.

6. Сделать выводы по лабораторной работе.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

К лабораторной работе № 1

Вид жидкости	$r, \text{ м}$	$W, \text{ м}^3$	$\Delta t, \text{ }^\circ\text{C}$	$\ell, \text{ м}$	$\Delta W, \text{ м}^3$	$\beta_t, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$\beta_t^*, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Спирт							

Таблица 2

К лабораторной работе № 1

Вид жидкости	$m, \text{ кг}$	$d, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\rho^*, \text{ кг/м}^3$
Вода					

Таблица 3

К лабораторной работе № 1

Вид жидкости	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\tau, \text{ с}$	$\ell, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$D, \text{ м}$	$\rho_{ш}, \text{ кг/м}^3$	$v, \text{ м}^2/\text{с}$	$v^*, \text{ м}^2/\text{с}$
М-8В					0,02			

Таблица 4

К лабораторной работе № 1

Вид жидкости	$M, \text{ м}^2/\text{с}^2$	$\tau, \text{ с}$	$v, \text{ м}^2/\text{с}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$v^*, \text{ м}^2/\text{с}$
М-8В					

Таблица 5

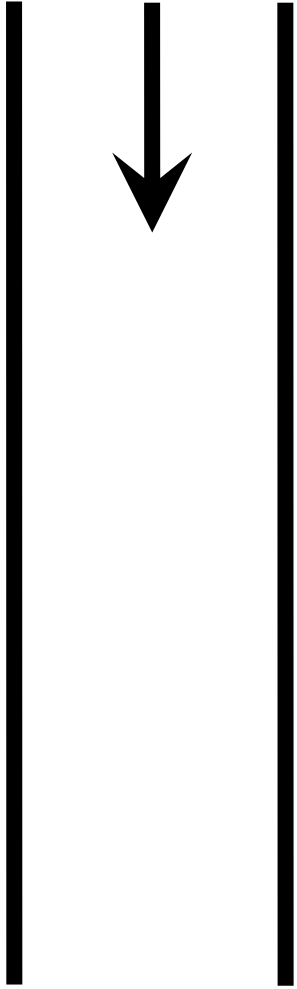
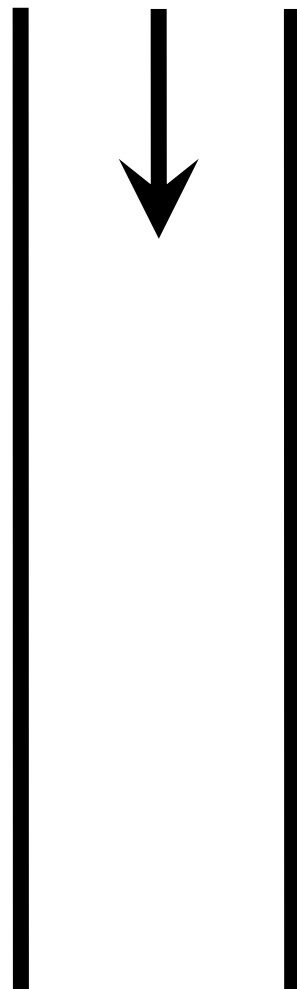
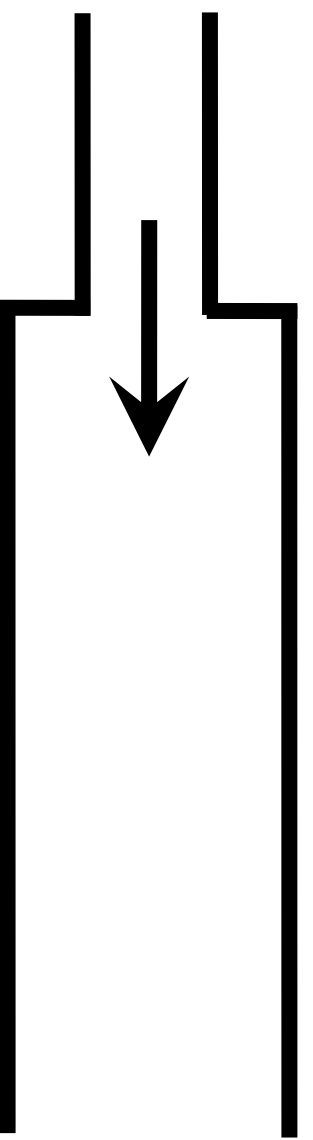
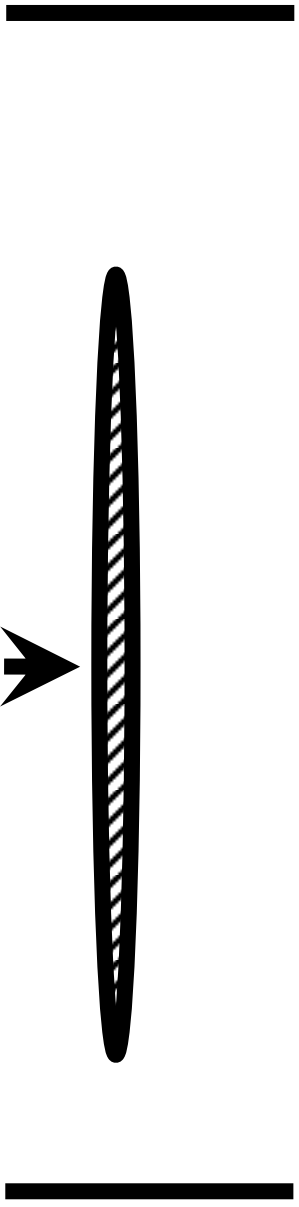
К лабораторной работе № 1

Вид жидкости	$K, \text{ м}^3/\text{с}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	n	$\sigma, \text{ Н/м}$	$\sigma^*, \text{ Н/м}$
М-8В					

К лабораторной работе № 3

№ п/п	Наименование величин, размерность	Обозначения, формулы	Условия опыта	
			$p_o > p_{at}$	$p_o < p_{at}$
1	Пьезометрическая высота, м	$h_{п}$		
2	Уровень жидкости в резервуаре, м	h		
3	Манометрическая высота, м	$h_{м}$		_____
4	Вакуумметрическая высота, м	$h_{в}$	_____	
5	Абсолютное давление на дне резервуара по показанию пьезометра, Па	$p_a = p_{at} + \rho \cdot g \cdot h_{п}$		
6	Абсолютное давление в резервуаре над жидкостью, Па	$p_a^o = p_{at} + \rho \cdot g \cdot h_{м}$ $p_a^o = p_{at} - \rho \cdot g \cdot h_{в}$	_____	_____
7	Абсолютное давление на дне резервуара через показания мановакуумметра и уровнемера, Па	$p_a^* = p_a^o + \rho \cdot g \cdot h$		
8	Относительная погрешность результатов определения давления на дне резервуара, %	$\delta = 100(p_a - p_a^*)/p_a$		

К лабораторной работе № 4

Ламинарный режим	Турбулентный режим	Расширение потока	Обтекание стенки
			

К лабораторной работе № 5

№ п/п	Наименование величин, размерность	Обозначения, формулы	№ опыта	
			1	2
1	Температура воды, °С	t		
2	Кинематический коэффициент вязкости, м ² /с	$\nu = (17,9 \cdot 10^{-4}) / (1000 + 34 \cdot t + 0,22 \cdot t^2)$		
3	Изменение уровня воды в баке, м	S		
4	Время наблюдения за уровнем S , с	τ		
5	Объем воды, поступившей в бак за время τ , м ³	$W = A \cdot B \cdot S$		
6	Расход воды, м ³ /с	$Q = \frac{W}{\tau}$		
7	Средняя скорость течения в канале, м/с	$V = \frac{Q}{\omega}$		
8	Число Рейнольдса	$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$		
9	Название режима течения	$Re < 2300$ – ламинарный режим $Re > 2300$ – турбулентный режим	_____	_____

К лабораторной работе № 6

Канал постоянного сечения								
№ п/п	Наименование величин, размерность	Обозначения, формулы	Сечения канала					
			I	II	III	IV	V	VI
1	Пьезометрический напор, м	$H_{\text{п}} = \frac{P}{\rho \cdot g}$						
2	Изменение уровня воды в баке, м	S						
3	Время наблюдения за уровнем S , с	τ						
4	Расход воды, м ³ /с	$Q = \frac{A \cdot B \cdot S}{\tau}$						
5	Площадь сечения канала, м ²	ω						
6	Средняя скорость, м/с	$V = \frac{Q}{\omega}$						
7	Скоростной напор, м	$H_{\text{к}} = \frac{\alpha \cdot V^2}{2 \cdot g}$						
8	Полный напор, м	$H = H_{\text{п}} + H_{\text{к}} = z + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha \cdot V^2}{2 \cdot g}$						

<i>Канал переменного сечения</i>								
№ п/п	Наименование величин, размерность	Обозначения, формулы	Сечения канала					
			I	II	III	IV	V	VI
1	Пьезометрический напор, м	$H_{\text{п}} = \frac{P}{\rho \cdot g}$						
2	Изменение уровня воды в баке, м	S						
3	Время наблюдения за уровнем S , с	τ						
4	Расход воды, м ³ /с	$Q = \frac{A \cdot B \cdot S}{\tau}$						
5	Площадь сечения канала, м ²	ω						
6	Средняя скорость, м/с	$V = \frac{Q}{\omega}$						
7	Скоростной напор, м	$H_{\text{к}} = \frac{\alpha \cdot V^2}{2 \cdot g}$						
8	Полный напор, м	$H = H_{\text{п}} + H_{\text{к}} = z + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha \cdot V^2}{2 \cdot g}$						

К лабораторной работе № 7

№ п/п	Наименование величин, размерность	Обозначения, формулы	Вид сопротивления			
			Внезапное сужение сечения		Внезапное расширение сечения	
			II	III	IV	V
1	Площадь сечения канала, м ²	ω				
2	Полный напор, м	$H = H_{\text{п}} + H_{\text{к}} = z + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha \cdot V^2}{2 \cdot g}$				
3	Скоростной напор, м	$H_{\text{к}} = \frac{\alpha \cdot V^2}{2 \cdot g}$	—			—
4	Опытные значения местных потерь, м	$\Delta h_{\text{в.с}} = H_{\text{II}} - H_{\text{III}}$			—	
		$\Delta h_{\text{в.р}} = H_{\text{IV}} - H_{\text{V}}$	—			
5	Коэффициенты местных сопротивлений	$\zeta_{\text{в.с}} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{\omega_{\text{III}}}{\omega_{\text{II}}}\right)$			—	
		$\zeta_{\text{в.р}} = \left(1 - \frac{\omega_{\text{IV}}}{\omega_{\text{V}}}\right)^2$	—			
6	Расчетные значения местных потерь, м	$\Delta h_{\text{в.с}}^* = \zeta_{\text{в.с}} \cdot \frac{V_{\text{III}}^2}{2 \cdot g}$			—	
		$\Delta h_{\text{в.р}}^* = \zeta_{\text{в.р}} \cdot \frac{V_{\text{IV}}^2}{2 \cdot g}$	—			
7	Относительное расхождение опытного и расчетного значений потерь	$\delta = (\Delta h_{\text{в.с}} - \Delta h_{\text{в.с}}^*) / \Delta h_{\text{в.с}}$			—	
		$\delta = (\Delta h_{\text{в.р}} - \Delta h_{\text{в.р}}^*) / \Delta h_{\text{в.р}}$	—			

К лабораторной работе № 8

№ п/п	Наименование величин, размерность	Обозначения, формулы	Значения величин
1	Пьезометрический напор, м	$\frac{P_{III}}{\rho \cdot g}$	
		$\frac{P_V}{\rho \cdot g}$	
2	Изменение уровня воды в баке, м	S	
3	Время наблюдения за уровнем H , с	τ	
4	Площадь сечения канала, м ²	ω	
5	Средняя скорость, м/с	$V_{III} = V_V = V = \frac{A \cdot B \cdot S}{\tau \cdot \omega}$	
6	Скоростной напор, м	$\frac{\alpha_{III} \cdot V_{III}^2}{2 \cdot g} = \frac{\alpha_V V_V^2}{2 \cdot g} = \frac{\alpha \cdot V^2}{2 \cdot g}$	
7	Температура воды, °С	t	
8	Кинематический коэффициент вязкости, м ² /с	$\nu = \frac{17,9 \cdot 10^{-4}}{1000 + 34 \cdot t + 0,22 \cdot t^2}$	
9	Опытное значение потерь напора на трение по длине, м	$\Delta h_{дл} = \frac{P_{III}}{\rho \cdot g} - \frac{P_V}{\rho \cdot g}$	
10	Длина ℓ между сечениями III и V, м	ℓ	
11	Диаметр сечения канала, м	$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \omega}{\pi}}$	
12	Число Рейнольдса	$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$	
13	Относительная шероховатость	$k = \Delta/d$	
14	Зона сопротивления		
15	Коэффициент гидравлического трения	λ	
16	Расчетное значение потерь напора на трение $\Delta h_{дл}^*$	$\Delta h_{дл}^* = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{V^2}{2 \cdot g}$	
17	Относительное расхождение опытного и расчетного значений потерь напора на трение	$\delta = (\Delta h_{дл} - \Delta h_{дл}^*) / \Delta h_{дл}$	