

Лабораторная работа 1. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Давлением называют физическую величину, характеризующую напряжение в жидкости, т. е. равную силе, приходящейся на единицу площади. В энергетическом смысле давление представляет собой энергию, содержащуюся в единице объема жидкости. За единицу давления в системе СИ принят паскаль ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$).

Ньютон (Н) – сила, сообщающая телу массой 1 кг ускорение 1 м/с^2 в направлении действия силы.

Различают давление атмосферное, избыточное, абсолютное, вакуумметрическое.

Атмосферное давление – это давление столба воздуха на уровне моря. Для измерения его применяются приборы, называемые барометрами.

Так как приборы для измерения давлений чаще всего используются в атмосферных условиях, то за точку отсчета удобно принимать атмосферное давление. Давление, отсчитываемое от атмосферного в положительную сторону (выше атмосферного), называется избыточным или манометрическим ($p_{\text{и}}$, $p_{\text{ман}}$). Для измерения избыточного давления применяются приборы, называемые манометрами.

Сумму атмосферного и избыточного давлений называют абсолютным или полным давлением ($p_{\text{полн}}$). Если абсолютное давление меньше атмосферного, то их разность называют вакуумметрическим давлением ($p_{\text{вак}}$). Приборы для измерения вакуумметрического давления называются вакуумметрами.

Давление в любой точке покоящейся однородной жидкости можно вычислить по основному уравнению гидростатики:

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (1.1)$$

где p_0 – давление на свободной поверхности жидкости, так называемое внешнее давление;

ρgh – давление столба жидкости, так называемое весовое, или гидростатическое, давление;

ρ – плотность жидкости;

h – глубина погружения точки под уровень жидкости.

Если в уравнении (1.1) $p_0 = p_{\text{ат}}$, а $p > p_{\text{ат}}$, то избыточное давление $p_{\text{и}} = p - p_{\text{ат}} = \rho gh$. В случае когда $p_0 = p_{\text{ат}}$, то вакуумметрическое давление $p_{\text{вак}} = p_{\text{ат}} - p = \rho gh$. Поэтому небольшие величины как избыточного, так и вакуумметрического давления можно измерить по высоте h столба жидкости в стеклянной трубке, один конец которой присоединяется

к месту, где определяется давление, а второй сообщается с атмосферой (рис. 1.1, *a*, *б*, *в*). Простейший жидкостный манометр, изображенный на рис. 1.1, *a*, называется пьезометром. При значительных величинах избыточного или вакуумметрического давлений применяются U-образные стеклянные трубки, заполненные ртутью (рис. 1.1, *б*, *в*). Избыточное давление в точке *A* (рис. 1.1, *б*) согласно основному уравнению гидростатики вычисляется по формуле

$$p_A = g(\rho_{рт} h - \rho h_1), \quad (1.2)$$

где $\rho_{рт}$, ρ – соответственно плотности ртути и жидкости, давление в которой измеряется.

Вакуумметрическое давление в газовой среде (рис. 1.1, *в*)

$$p_{\text{вак}} = \rho_{рт} gh. \quad (1.3)$$

Так как плотность газа составляет весьма мизерную долю от плотности ртути, то влиянием высоты его столба в соединительном трубопроводе пренебрегают.

Однотрубные (чашечные) манометры (рис. 1.1, *г*) аналогичны U-образным, но одна часть трубки у них заменена сосудом значительно большего диаметра (чашкой), что позволяет сглаживать колебания уровня и делает более удобным измерение (от нуля, расположенного на уровне свободной поверхности). При небольших давлениях для повышения точности отсчета применяются чашечные манометры с наклонной трубкой (микроманометры), что увеличивает длину шкалы. В этом случае измеряемое избыточное давление

$$p = \rho g l \sin \alpha. \quad (1.4)$$

Для измерения разности давлений в двух точках используется дифференциальный манометр (рис. 1.1, *д*). Он представляет собой U-образную трубку, заполненную жидкостью с значительно большей плотностью, чем в местах измерения давления (чаще всего ртутью). Разность давлений (рис. 1.1, *д*)

$$\Delta p = p_2 - p_1 = (\rho_{рт} - \rho)gh. \quad (1.5)$$

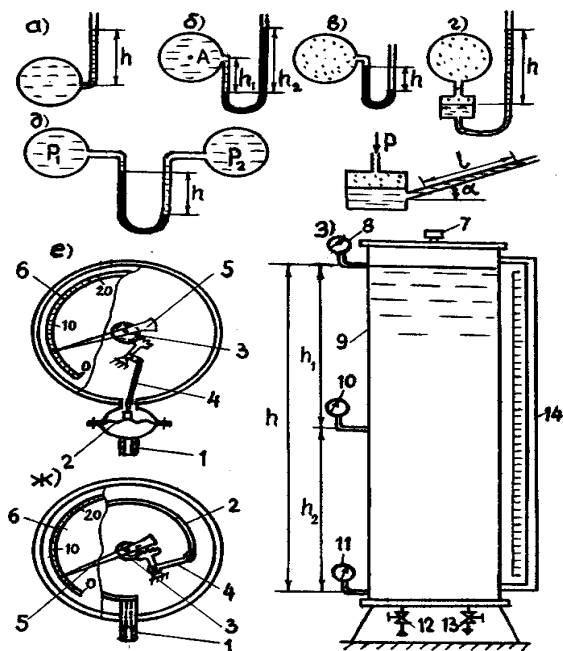


Рис. 1.1. Схема опытной установки

Для измерения больших давлений применяются механические манометры. Из них наиболее распространены пружинные манометры. На рис. 1.1, ж представлена схема манометра с трубчатой одновитковой пружиной. Трубчатая пружина имеет в сечении овальную форму, изготавливается из латуни или стали. Один конец витка ее закреплен в штуцере 1, соединенном с измеряемой средой. Второй, запаянный конец пружины, через тягу 4 и зубчатую передачу 3 соединен со стрелкой 5. При повышении давления в полости пружины она разгибается и поворачивает стрелку относительно шкалы 6. В приборах, самопишущих или с дистанционной передачей показаний, применяются многовитковые трубчатые пружины.

Манометр, схема которого представлена на рис. 1.1, е, отличается тем, что основной рабочий элемент его – пружина 2 – имеет пластинчатую форму. Пружина зажата между двумя половинами корпуса. Нижняя полость соединяется через штуцер 1 с измеряемой средой,

верхняя – сообщается с атмосферой. При повышении давления в нижней полости пружина прогибается и через шток 4, зубчатую передачу 3 воздействует на стрелку 5, которая поворачивается по шкале 6.

Механические пружинные вакуумметры работают по тому же принципу, что и пружинные манометры. Различие лишь в том, что трубчатая или пластинчатая пружина под действием вакуума перемещается в противоположную сторону. Выпускаются также комбинированные приборы – мановакуумметры, позволяющие измерять как избыточное, так и вакуумметрическое давления. В них нуль расположен в середине шкалы. При избыточном давлении стрелка перемещается в сторону положительных, а при вакуумметрическом давлении – в сторону отрицательных значений.

Выпускаются также пружинные дифференциальные манометры. Принцип действия такого прибора можно пояснить, используя рис. 1.1, е. Если нижнюю камеру (под пружиной) соединить трубкой с одной точкой измеряемой среды, а верхнюю (над пружиной) – с другой точкой, то прогиб пружины будет соответствовать разности давлений в измеряемых точках, что и определится по положению стрелки 5 на шкале 6. Чтобы стрелка перемещалась по шкале в нужном направлении, штуцер с большим давлением помечается знаком «+», а с меньшим – знаком «-».

Для измерения небольших величин давления и разрежения выпускаются также механические сильфонные манометры и вакуумметры. Чувствительным элементом у них является сильфон, представляющий собой гофрированную тонкостенную трубку из высокопрочного сплава, которая помещена в корпус. При изменении давления меняется длина сильфона. Перемещение свободного конца сильфона посредством тяги передается стрелке прибора.

Для измерения давлений в различных пределах выпускаются также электрические манометры, принцип действия которых основан на использовании различного рода электрических явлений: на способности пьезоэлектрических материалов создавать электродвижущую силу, тензорезисторов менять электрическое сопротивление под нагрузкой и др.

Такие приборы обычно имеют более сложную конструкцию.

Задачи исследования:

1) изучить конструкции приборов для измерения избыточного и вакуумметрического давлений;

2) создавая в лабораторной установке различные давления, измерить их применяемыми приборами;

3) используя основное уравнение гидростатики, вычислить давления в местах подключения приборов, сопоставить их с опытными величинами.

Лабораторная установка. Сосуд, представляющий собой вертикальную трубку 9 (рис. 1.1, з), закрытую с обоих торцов крышками, заполняется водой через вентиль 12 из напорного бака лаборатории или насосной станции, что позволяет создавать в нем избыточные давления различной величины. При выпуске части воды через вентиль 13 вверху сосуда образуется вакуум. Для измерения избыточных давлений в нижней и средней частях сосуда присоединены манометры 11 и 10, а в верхней – мановакуумметр 8. Уровень воды в сосуде определяется по пьезометру 14. Открыв пробку 7 в верхней крышке, можно создать атмосферное давление на свободной поверхности воды.

Проведение опытов. Всего проводятся три опыта, различающихся между собой величинами давлений в сосуде, в приведенном ниже порядке.

1. При открытых вентиле 12 и пробке 7, закрытом вентиле 13 сосуд 9 заполняется водой полностью, затем пробка 7 закрывается, создается избыточное давление в точке присоединения мановакуумметра 8. Измеряются давления манометрами 10, 11 и мановакуумметром 8.

2. Открывается вентиль 13 и выпускается часть воды из сосуда 9, чтобы прибор 8 показывал вакуумметрическое давление и $h > h_2$, вентили 13 и 12 закрываются, проводится измерение давлений приборами 8, 10, 11, измеряется показание h пьезометра 14.

3. Открывается пробка 7 для сообщения верхней части сосуда с атмосферой; регистрируются показания всех приборов.

Результаты опытов и их обработки записываются в табл. 1.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 1.1. Результаты измерения и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1. Пьезометрический напор	мм			
2. Показания давления мановакуумметра p_m	Па			
3. Показания давления первого манометра $p_{m1}^{от}$	Па			
4. Вычисленное давление в точке подсоединения первого манометра $p_{m1}^в$	Па			
5. Относительная разность Δp_1	%			
6. Показания давления второго манометра $p_{m2}^{от}$	Па			
7. Вычисленное давление в точке подсоединения второго манометра $p_{m2}^в$	Па			
8. Относительная разность Δp_2	%			

Постоянные величины: $h_1 = \dots$ см; $h_2 = \dots$ см; $p_{ат} = \dots$ кПа.

Обработка результатов. По полученным результатам измерений выполняются следующие вычисления:

1) при отсутствии в сосуде свободной поверхности жидкости (в первом опыте) избыточные давления на уровнях 1–1 и 2–2 определяются по следующим формулам:

$$p_{m1} = p_{мв} + \rho g h_1, \quad (1.6)$$

$$p_{m2} = p_{m1} + \rho g h_2 = p_{мв} + \rho g (h_1 + h_2); \quad (1.7)$$

2) при наличии в сосуде свободной поверхности жидкости (во втором и третьем опытах) избыточные давления определяются по зависимостям

$$p_{m1} = p_{мв} + \rho g (h + h_2), \quad (1.8)$$

$$p_{m2} = p_{m1} + \rho g h_2 = p_{мв} + \rho g h; \quad (1.9)$$

3) определяются абсолютные (полные) давления жидкости в плоскостях 1–1 и 2–2

$$p_{n.i} = p_{m.i} + p_{ат}; \quad (1.10)$$

4) по каждому опыту определяется относительное отклонение (в %) расчетного значения давления от опытного:

$$\Delta p = \left(\frac{p_r}{p_{оп}} - 1 \right) 100. \quad (1.11)$$

Контрольные вопросы

1. Что называется абсолютным (полным), избыточным, вакуумметрическим давлением?
2. Объясните устройство и принцип действия приборов для измерения и разности давлений.
3. Как вычислить давление в точке покоящейся жидкости, используя основное уравнение гидростатики?

Лабораторная работа 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОКОЯ ЖИДКОСТИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СОСУДЕ

В лабораторной работе изучается частный случай относительного покоя жидкости. Цилиндрический сосуд заполнен жидкостью и вращается с постоянной угловой скоростью. На единицу массы жидкости действуют центробежная сила инерции и сила тяжести. Проекция этих сил на соответствующие координатные оси равны:

$$F_x = \omega_0^2 x; \quad F_y = \omega_0^2 y; \quad F_z = -g, \quad (2.1)$$

где x, y, z – координаты точки жидкости.

Подставив значение проекций единичной массовой силы в дифференциальное уравнение поверхности равного давления

$$F_x dx + F_y dy + F_z dz = 0, \quad (2.2)$$

получим

$$\omega_0^2 x dx + \omega_0^2 y dy - g dz = 0 \quad (2.3)$$

и в результате интегрирования

$$Z_{\text{св}} - Z_0 = Z' = \frac{\omega_0^2 r^2}{2g}, \quad (2.4)$$

где Z – высота параболоида вращения;

$Z_{\text{св}}$ – координата свободной поверхности жидкости в произвольной точке;

Z_0 – то же для точки с координатами $x = 0, y = 0$;

ω_0 – угловая скорость вращения цилиндра;

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – расстояние произвольной точки свободной поверхности жидкости от оси вращения.

Уравнение (2.4) показывает, что в рассматриваемом случае поверхность равного давления представляет собой параболоид вращения. При известном радиусе цилиндра r_0 и его угловой скорости вращения ω_0 оно позволяет построить кривую свободной поверхности.

Из равенства объема жидкости до вращения и при вращении цилиндра (рис. 2.1) можем записать, что

$$W_{ДЕМN} = W_{АСMН} - W_{ABC}, \quad (2.5)$$

где $W_{ДЕМN} = \pi r_0^2 H$ – объем жидкости в цилиндре до вращения;

H – начальный уровень жидкости в цилиндре;

$W_{АСMН} = \pi r_0^2 h_{СТ}$ – объем при наибольшей высоте подъема свободной поверхности жидкости у стенки цилиндра;

$h_{СТ}$ – максимальная высота подъема жидкости у стенки цилиндра.

Так как объем параболоида вращения

$$W_{ABC} = \frac{1}{2} \pi r_0^2 h', \quad (2.6)$$

тогда максимальная высота параболоида вращения будет равна:

$$h' = 2(h_{СТ} - H) = 2h_{пов} \quad (2.7)$$

или

$$h' = 2(H - Z_0) = 2h_{пон}, \quad (2.8)$$

где $h_{пов}$, $h_{пон}$ – высоты наибольшего повышения и понижения свободной поверхности у боковой стенки и на оси вращения по сравнению с первоначальным уровнем жидкости в цилиндре.

Эти уравнения находят применение при решении практических задач.

Задачи исследования:

- 1) определить высоту параболоида вращения опытным путем;
- 2) вычислить высоту параболоида вращения по формуле (2.4) для условий опытов;
- 3) сопоставить опытную высоту параболоида вращения с вычисленной по формуле.

Лабораторная установка. Лабораторная работа проводится на специальной установке (рис. 2.1), состоящей из цилиндра *1* с прозрачными стенками, вращающегося с угловой скоростью ω_0 .

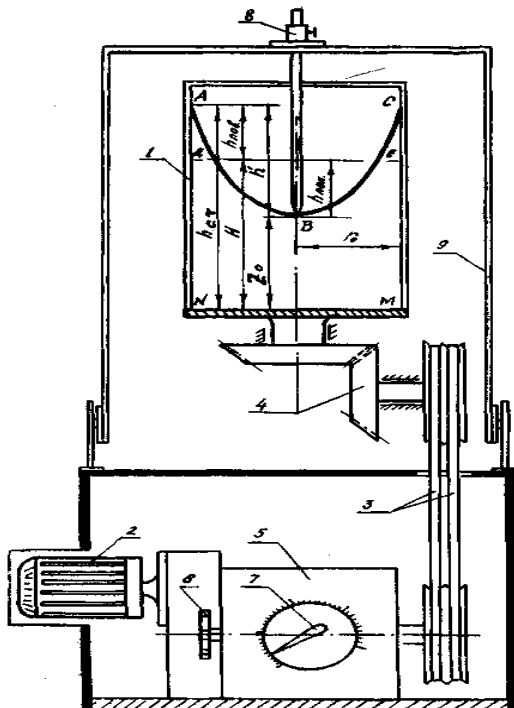


Рис. 2.1. Схема опытной установки

Вращение цилиндра *1* осуществляется от электродвигателя *2* через клиноременную передачу *3* и конические шестерни *4*. Регулировка частоты вращения осуществляется редуктором *5* (рукоятка *б*). На редукторе *5* имеется указатель *7* со шкалой частоты вращения цилиндра. Отметки свободной поверхности жидкости в цилиндре измеряются шпигельмасштабом *8*, закрепленным на защитном кожухе *9*.

Проведение опытов.

1. Замеряется радиус цилиндра r_0 и отметка уровня жидкости при глубине H в нем до начала вращения.

2. Производится запуск установки и редуктором устанавливается необходимая частота вращения цилиндра.

3. При установившемся относительном покое замеряются отметки свободной поверхности жидкости на оси вращения и у стенки цилиндра.

Опыты проводятся при трех различных значениях частоты вращения цилиндра. Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 2.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 2.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1. Частота вращения цилиндра n	c^{-1}			
2. Угловая скорость ω_0	рад/с			
3. Отметка свободной поверхности жидкости на оси вращения Z_0	см			
4. Отметка свободной поверхности жидкости у стенки цилиндра $h_{ст}$	см			
5. Высота параболоида вращения: опытная $h'_{оп}$ вычисленная $h'_т$	см			
	см			
6. Относительная разность $\Delta h'$	%			

Постоянные величины: радиус цилиндра $r_0 = \dots$ см; отметка уровня жидкости до начала опыта $H = \dots$ см.

Обработка результатов.

1. Определяется высота параболоида вращения по данным опыта:

$$h'_{оп} = h_{ст} - Z_0.$$

2. Определяется угловая скорость вращения цилиндра $\omega_0 = 2\pi n$.

3. Определяется высота параболоида вращения по формуле (2.4).

4. Находится разница в процентах между вычисленной и опытной высотами параболоида вращения.

Техника безопасности при работе на установке

1. Не допускается частота вращения цилиндра более $5 c^{-1}$ (300 об/мин).

2. Опыты проводятся при опущенном защитном кожухе.

3. Регулировка частоты вращения цилиндра производится только после включения установки.

4. Запрещается касаться электропроводки и корпуса электродвигателя.

Контрольные вопросы

1. Что называется относительным покоем жидкости?
2. Как рассчитываются координаты свободной поверхности жидкости при вращении цилиндра?
3. Как определяется давление при относительном покое жидкости на дно и боковые стенки цилиндра?
4. Зависит ли высота параболоида вращения от плотности жидкости?

Лабораторная работа 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ПЛОСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Сила гидростатического давления жидкости на ограниченную плоскую поверхность для условий (рис. 3.1), когда внешнее давление равно атмосферному, определяется по формуле

$$F_p = \rho g h_{\text{ц.т}} \omega, \quad (3.1)$$

где $h_{\text{ц.т}}$ – глубина погружения центра тяжести рассматриваемой поверхности;

ω – площадь этой поверхности.

Так как плоская поверхность правильной формы имеет ось симметрии, то точка приложения силы, т. е. центр давления, будет находиться на ней и определяться одной ординатой относительно линии уреза жидкости (ось OX):

$$l_d = l_{\text{ц.т}} + \frac{I_0}{l_{\text{ц.т}} \omega}, \quad (3.2)$$

где $l_{\text{ц.т}}$ – ордината центра тяжести площади ω (при вертикальном расположении этой площади она равна $h_{\text{ц.т}}$);

I_0 – момент инерции площади ω относительно оси, проходящей через центр тяжести ее параллельно оси OX .

Как видно из формулы (3.2), центр давления расположен ниже центра тяжести площади ω на величину эксцентриситета:

$$e = \frac{I_0}{l_{\text{ц.т}} \omega}. \quad (3.3)$$

Задачи исследования:

- 1) определить силу гидростатического давления на плоскую поверхность опытным путем;
- 2) вычислить эту силу для условий опытов по формуле (3.1);
- 3) сопоставить полученные результаты.

Лабораторная установка. Рассматриваемой плоской поверхностью является круглый клапан 2 (рис. 3.1), закрывающий отверстие в стенке резервуара 1, наполненного водой. Клапан посредством рычага 4 шарнирно прикреплен к стенке резервуара и может поворачиваться относительно оси K под действием грузов 8, подвешенных на тросе, который уложен на блоки 3 и присоединен к рычагу 4. Задвижки 6 и 7 предназначены соответственно для наполнения резервуара водой и сброса ее. Глубина погружения центра тяжести клапана измеряется пьезометром 5.

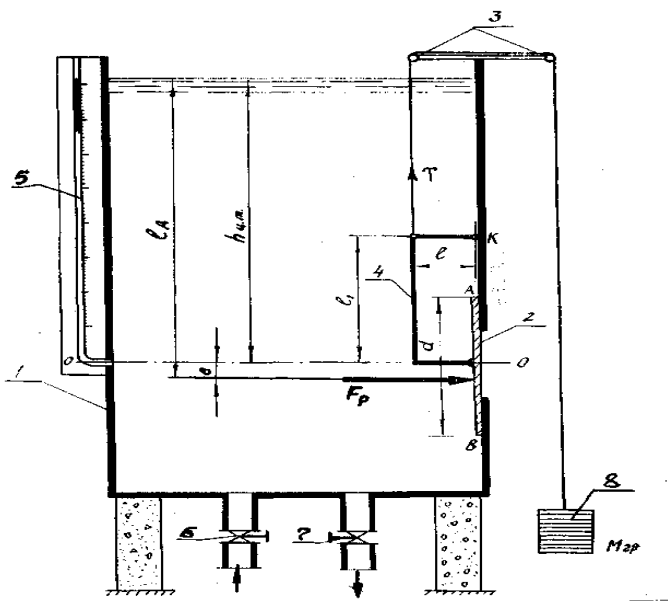


Рис. 3.1. Схема опытной установки

Проведение опытов.

1. Замеряются диаметр d клапана 2, плечи l и l_1 рычага 4.

2. Подбирается масса груза (противовеса) $m_{пр}$, достаточная для преодоления сил трения и веса клапанного устройства при его открытии при незаполненном резервуаре водой.

3. Резервуар заполняется водой.

4. На подвеску устанавливаются грузы массой $m_{гр}$.

5. Открывается задвижка 7, уровень воды в резервуаре понижается. В момент открытия клапана, определяемый визуально по вылету струи из отверстия и падению грузов, фиксируется показание пьезометра 5, т. е. величина $h_{ц.т}$.

Опыты проводятся для трех различных значений массы грузов. Результаты измерений записываются в табл. 3.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 3.1. Результаты измерения и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1. Глубина погружения центра тяжести клапана $h_{ц.т}$	см			
2. Масса груза $m_{гр}$	кг			
3. Подъемное усилие T	Н			
4. Величина эксцентриситета e	см			
5. Сила гидростатического давления: опытная $F_{оп}$ вычисленная F_p	Н Н			
6. Относительная разность ΔF	%			

Постоянные величины: диаметр клапана $d = \dots$ см; площадь клапана $\omega = \dots$ см²; плечо $l = \dots$ см; $l_1 = \dots$ см; масса противовеса $m_{пр} = \dots$ кг.

Обработка результатов.

1. Определяется подъемное усилие открытия клапана:

$$T = (m_{гр} - m_{пр})g. \quad (3.4)$$

2. По формуле (3.3) вычисляется величина эксцентриситета, соответствующая полученному значению $h_{ц.т}$, при котором открылся клапан:

$$e = \frac{I_0}{l_{ц.т} \omega} = \frac{d^2}{16h_{ц.т}}. \quad (3.5)$$

3. Из уравнения моментов сил относительно оси K определяется опытное значение силы гидростатического давления на клапан:

$$F_{\text{оп}} = T \frac{\ell}{\ell_1 + e}. \quad (3.6)$$

4. По формуле (3.1) вычисляется расчетная величина силы гидростатического давления, соответствующая полученному в опыте значению $h_{\text{д.т.}}$.

5. Относительное отклонение (в %) расчетного значения силы гидростатического давления от опытного определяется по формуле

$$F_{\text{оп}} = \left(\frac{F_{\text{р}}}{F_{\text{оп}}} - 1 \right) 100. \quad (3.7)$$

Все результаты вычислений также заносятся в табл. 3.1.

Контрольные вопросы

1. Как определяется сила гидростатического давления жидкости на плоскую поверхность расчетным и опытным путем?
2. Почему сила гидростатического давления определяется в момент открытия клапана?
3. Какой вид имеет эпюра гидростатического давления на плоскую поверхность?
4. Как найти центр давления?

Лабораторная работа 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАВАНИЯ ТЕЛ В ЖИДКОСТИ

В лабораторной работе будет изучаться только надводное плавание тел в жидкости – плавучесть и остойчивость.

Плавучестью тела называется способность тела плавать в полупогруженном состоянии. Условие плавания тела выражается равенством

$$F_A = gM = G, \quad (4.1)$$

где M – масса тела;

F_A – результирующая сила давления жидкости на погруженное в нее тело – архимедова сила, которая направлена вверх и проходит через центр тяжести водоизмещения.

Архимедова сила F_A находится по формуле

$$F_A = \rho g W, \quad (4.2)$$

где ρ – плотность жидкости, в которую погружено тело;

W – объем жидкости, вытесненный телом, или водоизмещение.

Остойчивостью называется способность плавающего тела при отклонении в заданных пределах от положения равновесия возвращаться в это положение после прекращения действия отклоняющих сил. В изучаемом курсе гидравлики рассматривается остойчивость при надводном плавании тел, при малых углах крена ($\alpha < 15^\circ$). В этом случае считается, что центр водоизмещения D перемещается по некоторой дуге, проведенной из точки пересечения линии действия силы F_A с осью плавания 0–0. Эта точка называется метacentром (рис. 4.1, точка M).

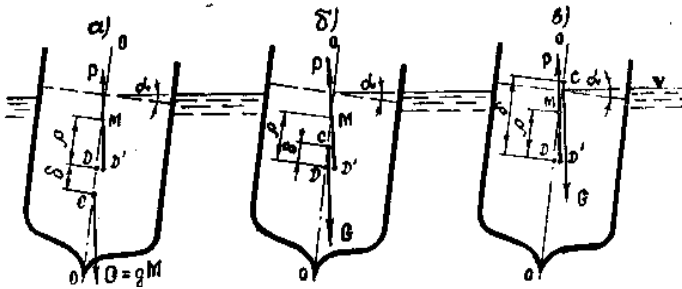


Рис. 4.1. Схема к расчету остойчивости плавающего тела

Остойчивость плавающего тела зависит от положения центров тяжести C и водоизмещения D , а также метacentра M . Рассмотрим различное расположение этих центров:

а) центр тяжести C плавающего тела расположен ниже центра водоизмещения D . Тогда восстанавливающий момент равен (рис. 4.1, а):

$$M_B = F_A \rho_0 \sin \alpha + G \delta \sin \alpha, \quad (4.3)$$

где ρ_0 – метacentрический радиус, т. е. расстояние между центром водоизмещения D и метacentром M ;

δ – расстояние между центрами тяжести C и водоизмещения D .

Метacentрический радиус находится по формуле

$$\rho_0 = \frac{I_0}{W}, \quad (4.4)$$

где I_0 – момент инерции плоскости плавания относительно продольной оси (рис. 4.2).

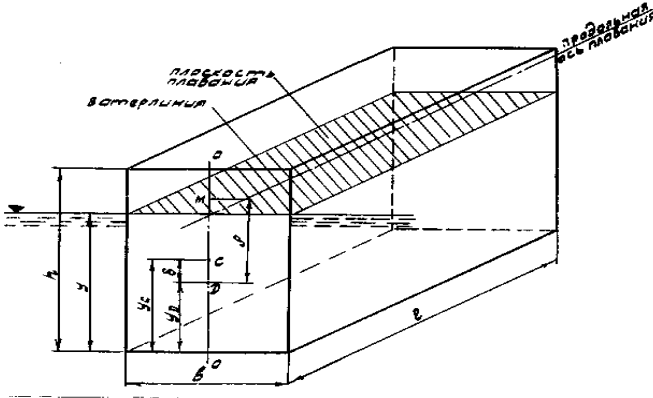


Рис. 4.2. Схема к расчету плавучести тела

Из уравнения (4.3) следует, что в этом случае плавающее тело всегда устойчиво, так как силы F_A и G стремятся восстановить плавающее тело в первоначальное положение;

б) центр тяжести C плавающего тела расположен выше центра водоизмещения D . Тогда восстанавливающий момент равен (рис. 4.1, б):

$$M_v = F_A \rho_0 \sin \alpha - G \delta \sin \alpha. \quad (4.5)$$

Плавающее тело будет устойчивым, если восстанавливающий момент будет положительным. Так как $F_A = G$, то из уравнения (4.5) следует, что тело будет устойчивым при условии

$$\rho_0 - \delta > 0 \text{ или } \rho_0 > \delta; \quad (4.6)$$

в) если центр тяжести C плавающего тела расположен выше метacentра M , то тело неустойчиво; возникающая пара сил G и F_A стремится увеличить крен (рис. 4.1, в), т. е.

$$\rho_0 - \delta < 0 \text{ или } \rho_0 < \delta. \quad (4.7)$$

Задачи исследования:

- 1) определить плавучесть и остойчивость тела в жидкости опытным путем;
- 2) вычислить плавучесть и остойчивость тела в жидкости для условий опытов;
- 3) сопоставить опытные и вычислительные величины по плавучести и остойчивости тела.

Оборудование для проведения опытов. Для проведения опытов имеется резервуар с жидкостью, набор образцов плавающих тел простой геометрической формы (параллелепипед, призма, цилиндр), выполненных из материалов различной плотности, весы для определения массы образцов.

Проведение опытов. В работе предусматривается три опыта, которые отличаются между собой формой плавающего тела и плотностью материала.

Рекомендуется следующий порядок проведения опытов:

- 1) замеряются размеры плавающего тела и определяется его масса;
- 2) образец опускается в жидкость и определяется его осадка y (глубина погружения в жидкость наинизшей точки смоченной поверхности);
- 3) создается крен плавающего тела в пределах $10-15^\circ$ и фиксируется его возможность возвращения в первоначальное положение.

Результаты измерений и наблюдений заносятся в журнал лабораторных работ (табл. 4.1).

Обработка результатов. В качестве примера показан расчет условия плавания однородного тела формы параллелепипеда (рис. 4.2). При этом рекомендуется следующий порядок вычислений:

- 1) вычисляется плотность образца

$$\rho_m = M / W_0,$$

где W_0 – объем образца;

2) исходя из условия плавания тела ($F_A = G$) вычисляется осадка образца:

$$y = \frac{\rho_r}{\rho} h, \quad (4.8)$$

где ρ – плотность жидкости;

h – высота образца;

Т а б л и ц а 4.1. Результаты измерений и обработка опытных данных

Наименование	Единица измерения	Форма образца		
1. Размер образца:				
длина ℓ	см			
ширина b	см			
высота h	см			
2. Объем образца W_0	см ³			
3. Масса образца M	г			
4. Плотность материала образца ρ	г/см ³			
5. Осадка образца:				
опытная $y_{оп}$	см			
вычисленная $y_{выч}$	см			
6. Расстояние до центра тяжести y_c	см			
7. Расстояние до центра водоизмещения y_p	см			
8. Расстояние между центром тяжести и центром водоизмещения δ	см			
9. Момент инерции плоскости плавания I_0	см ⁴			
10. Объем водоизмещения W	см ³			
11. Метацентрический радиус ρ_0	см			
12. Условие остойчивости:				
опытной				
по данным вычислений				

3) вычисляется метацентрический радиус:

$$\rho_0 = \frac{I_0}{W} = \frac{b^2}{12y}; \quad (4.9)$$

4) вычисляется расстояние между центрами тяжести и водоизмещения:

$$\delta = y_c - y_d = 0,5(h - y); \quad (4.10)$$

5) сравниваются значения метацентрического радиуса ρ_0 и δ . При

$$\rho_0 > \delta - \text{тело остойчиво,}$$

$$\rho_0 < \delta - \text{тело нестойчиво;}$$

6) в результате проведенных опытов и вычислений дается заключение об остойчивости плавающего тела.

Контрольные вопросы

1. Как определяется плавучесть тела и от чего она зависит?
2. Что называется ватерлинией, плоскостью плавания и осадкой плавающего тела?
3. Как определяется метацентрический радиус плавающего тела?
4. От чего зависит осадка плавающего тела и как она определяется?
5. Чем определяется условие остойчивости плавающего тела? Объяснить физический смысл этого условия.
6. Почему определяется остойчивость плавающего тела только относительно продольной оси плавания?

Лабораторная работа 5. ИССЛЕДОВАНИЕ И ГРАФИЧЕСКАЯ ИЛЛЮСТРАЦИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Если в потоке несжимаемой жидкости действуют из массовых сил только сила тяжести, то выражение полной удельной энергии в любой точке можно представить в следующих трех вариантах:

$$E_G = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g}, \quad (5.1)$$

$$E_w = \rho g z + p + \frac{u^2}{2} \rho, \quad (5.2)$$

$$E_m = g z + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}, \quad (5.3)$$

где z – превышение рассматриваемой точки над выбранной плоскостью отсчета (сравнения);

p , u – соответственно гидростатическое давление и скорость движения жидкости в этой точке.

Формула (5.1) выражает энергию, приходящуюся на единицу веса (м), (5.2) – на единицу объема (Па), (5.3) – на единицу массы жидкости ($\text{м}^2/\text{с}^2$). Тогда удельной энергией в сечении потока называется энергия, приходящаяся на единицу количества (веса, объема, массы) жидкости.

В гидравлике широко применяется запись (5.1). Три составляющие правой части этого уравнения имеют следующий физический смысл:

z – удельная потенциальная энергия положения точки над плоскостью сравнения (геометрический напор);

$\frac{P}{\rho g}$ – удельная потенциальная энергия давления жидкости в точке (пьезометрический напор);

$\frac{u^2}{2g}$ – удельная кинетическая энергия (скоростной напор).

Уравнение Бернулли выражает закон сохранения энергии в потоке жидкости. Оно устанавливает связь между удельными энергиями в двух любых сечениях потока. Если использовать запись (5.1) применительно не к точкам, а к сечениям потока, то уравнение Бернулли представляется в следующем виде:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{тр}, \quad (5.4)$$

где V_1, V_2 – средние скорости движения жидкости в первом и втором сечениях потока;

α_1, α_2 – коэффициенты кинетической энергии в этих сечениях;

$h_{тр}$ – потери энергии при движении жидкости от первого сечения ко второму.

Полная удельная энергия в первом сечении потока отличается от полной удельной энергии во втором сечении на величину потерь $h_{тр}$.

При изменении положения и площади сечения потока происходит преобразование одного вида энергии в другой. Уравнение (5.4) позволяет находить одну из неизвестных составляющих полной удельной энергии, если известны все остальные.

Задачи исследования:

1) на лабораторной установке определить по показаниям трубок Пито и пьезометров составляющие полной удельной энергии в центрах тяжести трех различных по площади сечениях потока;

2) проанализировать визуально во время опытов и по подсчетам преобразование одного вида энергии в другой при изменении положения и площади сечения потока;

3) построить по результатам опытов схематично линии, показывающие изменение полной и потенциальной удельных энергий в сечениях потока вдоль пути его движения.

Лабораторная установка. В наклонный трубопровод 4 (рис. 5.1) переменного сечения поступает вода из резервуара 1, питаемого через

задвижку 3; постоянный уровень воды в резервуаре поддерживается с помощью переливного устройства 2.

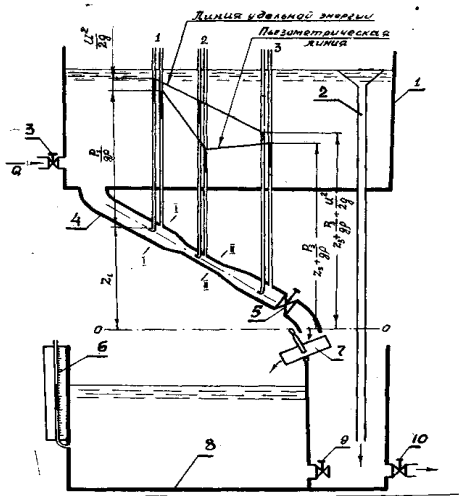


Рис. 5.1. Схема установки для демонстрации уравнения Бернулли

В центрах тяжести трех сечений трубопровода 4, расположенных на определенных расстояниях одно от другого, подключены трубки Пито и пьезометры. Трубка Пито (изогнутая навстречу потоку) служит для измерения полной удельной энергии, пьезометр – удельной потенциальной энергии давления.

Расход воды в опытном трубопроводе 4 регулируется задвижкой 5. Измеряется он объемным способом. Для этого поворотный желоб 7 наклоняется в сторону мерного резервуара 8 и определяется высота наполнения последнего по пьезометру 6 за время t . Сброс воды и опорожнение мерного резервуара производится через задвижки 9 и 10.

Проведение опытов.

1. С помощью задвижек 5 и 3 устанавливается определенный расход воды в опытном трубопроводе. При этом нужно добиться, чтобы показания пьезометров и трубок Пито стабилизировались.

2. Измеряется для каждого сечения удельная энергия положения – высота z от принятой плоскости сравнения до центра тяжести сечения.

3. Во всех трех сечениях по пьезометрам определяется

удельная энергия давления $\frac{p}{\rho g}$, а по трубкам Пито – сумма удельных энергий давления и кинетической $\left(\frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g}\right)$.

4. Поворотом желоба 7 поток направляется в мерный резервуар 8 и по секундомеру определяется время t , в течение которого уровень в пьезометре 6 поднимается на заданную высоту h .

5. Измеряются расстояния L_1 и L_2 между сечениями опытного трубопровода и площадь сечения в плане мерного резервуара.

Измеренные и вычисленные показатели заносятся в табл. 5.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 5.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера сечений		
		1	2	3
1. Диаметр трубопровода d	см			
2. Площадь сечения ω	см ²			
3. Высота z	см			
4. Напор по показаниям пьезометра $p / (\rho g)$	см			
5. Пьезометрический напор $z + p / (\rho g)$	см			
6. Показания, снятые по трубкам Пито, $p / (\rho g) + u^2 / (2g)$	см			
7. Полный напор по показанию приборов H	см			
8. Потери напора по показаниям приборов $h_{тр}$	см			
9. Средняя скорость в сечениях потока V	см/с			
10. Скоростной напор, вычисленный по средней скорости, $\alpha V^2/(2g)$	см			
11. Полный напор по средней скорости H' [5+10]	см			
12. Потери напора, вычисленные по средней скорости, $h'_{тр}$	см			
13. Расстояние между сечениями L	см			
14. Гидравлический уклон $I = h'_{тр}/L$	см			

Постоянные величины: объем воды в мерном баке $W = b\ell h = \dots$ см³; размеры мерного бака в плане $b = \dots$ см; $\ell = \dots$ см; показание пьезометра на мерном баке $h = \dots$ см; время наполнения мерного бака $t = \dots$ с; расход потока $Q = W/t = \dots$ см³/с.

Обработка результатов.

1. По показаниям трубки Пито и пьезометра в каждом сечении вычисляются соответственно полная удельная энергия E_G (полный напор H) (5.1) и удельная потенциальная энергия $z + \frac{p}{\rho g}$ относительно

принятой плоскости сравнения.

2. Потери напора между соседними сечениями трубопровода равны разности полных напоров в этих сечениях:

$$h_{\text{тр}} = H_1 - H_2. \quad (5.5)$$

3. Расход жидкости в опытном трубопроводе и средняя скорость в сечении определяются соответственно по следующим формулам:

$$Q = \frac{W}{t} = \frac{b\ell h}{t}, \quad (5.6)$$

$$V = \frac{Q}{\omega}, \quad (5.7)$$

где W – объем жидкости, поступившей в мерный резервуар за время опыта;

ω – площадь сечения трубопровода.

4. Вычисляется удельная кинетическая энергия (скоростной напор) $\frac{\alpha V^2}{2g}$ и полная удельная энергия (полный напор) $H' = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g}$ по

средней скорости потока в каждом сечении. Так как режим движения в трубопроводе турбулентный, то коэффициент кинетической энергии $\alpha = 1,13-1,0$ (с повышением турбулентности он уменьшается и для условий данной лабораторной установки может быть принят близким к 1,0).

5. По полным напорам, вычисленным с учетом средних скоростей, определяются аналогично (5.5) потери напора $h'_{\text{тр}}$, а также гидравлический уклон между соседними сечениями:

$$I = \frac{h'_{\text{тр}}}{L}. \quad (5.8)$$

По полученным результатам опытов строятся графики изменения полной и потенциальной удельных энергий потока вдоль пути его

движения, пример построения которых для исследуемого трубопровода (см. рис. 5.1) показан на рис. 5.2.

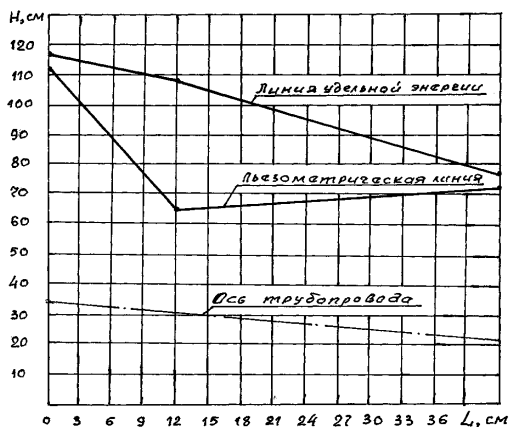


Рис. 5.2. Пьезометрическая линия и линия полной удельной энергии

Для построения линии полной удельной энергии используются ее значения, подсчитанные по средним скоростям в сечениях потока.

Контрольные вопросы

1. Что называется в гидравлике удельной энергией?
2. Как можно определить опытным путем удельную потенциальную и кинетическую энергии в сечении потока?
3. Как изменяются удельные кинетическая и потенциальная энергии при изменении площади сечения потока?

Лабораторная работа 6. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ В НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Расход – это количество жидкости, протекающее через живое сечение трубы или канала в единицу времени. Количество жидкости может быть выражено в единицах массы (кг) или в единицах объема (m^3). Соответственно различают расход массовый (кг/с) и объемный (m^3/c).

Приборы для измерения расхода называют расходомерами, а для определения количества протекающей через них жидкости – счетчиками. Расходомер может быть совмещен со счетчиком в одном приборе.

Для измерения расхода жидкости или газа в напорных трубопроводах широко применяются сужающие устройства: диафрагма (рис. 6.1, а), сопло (рис. 6.1, б), труба Вентури (рис. 6.1, в). При движении потока через сужающее устройство создается перепад потенциальных напоров, обусловленный разностью площадей сечений ω_1 самого трубопровода и ω_2 сужающего устройства. Между расходом Q и перепадом потенциальных напоров существует определенная зависимость, которая может быть получена с помощью уравнения Бернулли и уравнения неразрывности (сплошности) движения для сечений 1–1 и 11–11 (рис. 6.1, а), выбранных соответственно перед сужающим устройством и в месте наибольшего сужения потока. Приняв за начало отсчета ось трубопровода 0–0, запишем уравнение Бернулли:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{тр}. \quad (6.1)$$

Изменение удельной потенциальной энергии обозначим через h . Тогда уравнение (6.1) примет вид

$$h = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} = \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_{тр}. \quad (6.2)$$

Далее продолжим вывод для идеальной жидкости ($h_{тр} = 0$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,0$). Так как согласно уравнению неразрывности потока $V_1 = V_2 \omega_2 / \omega_1$, то из равенства (6.2) получим теоретические значения скорости и расхода в трубопроводе:

$$V_2 = \sqrt{2g / (1 - \omega_2^2 / \omega_1^2)} \sqrt{h}; \quad (6.3)$$

$$Q_{т} = \omega_2 V_2 = \omega_2 \sqrt{2g / (1 - \omega_2^2 / \omega_1^2)} \sqrt{h}. \quad (6.4)$$

Как видно из уравнения (6.4), расход зависит от разности h потенциальных напоров в сужающем устройстве. Эту разность удобно определить с помощью дифференциального манометра. Так как в последнем применяется жидкость с большей плотностью (ρ_2), чем плотность жидкости в трубопроводе (ρ_1), то, используя основное уравнение гидростатики, величину h можно выразить через показание дифманометра h_d :

$$h = h_d (\rho_2 / \rho_1 - 1). \quad (6.5)$$

При прохождении реальной (вязкой) жидкости через сужающее устройство часть энергии ее теряется. Поэтому применительно к ней уравнение (6.4) будет давать завышенный результат. Необходимо ввести поправочный коэффициент $\mu = Q / Q_T$, который называется коэффициентом расхода. Учитывая его, а также зависимость (6.5), можно определить действительный расход жидкости:

$$Q = \mu A \sqrt{h_d}, \quad (6.6)$$

где

$$A = \omega_2 \sqrt{2g / (1 - \omega_2^2 / \omega_1^2) (\rho_2 / \rho_1 - 1)} \quad (6.7)$$

есть постоянная сужающего устройства.

Зависимость (6.6) применима для любого из сужающих устройств, представленных на рис. 6.1. Она нелинейна, поэтому шкала прибора неравномерная.

Коэффициент μ для каждого расходомера определяется опытным путем при различных расходах, а значит, и различных числах Рейнольдса, что позволяет получить зависимость $Q = \Phi(h_d)$. В области квадратичного сопротивления для данного расходомера $\mu = \text{const}$.

Действительный расход жидкости при тарировке прибора обычно измеряют объемным способом. Тарировочные данные представляют в виде графической зависимости $Q = \Phi(h_d)$. Пользуясь этим графиком, можно по величине h_d непосредственно и быстро находить расход Q , не прибегая к формуле (6.6).

Измерение давлений для определения величины h_d дифманометром производится из специальных кольцевых камер (рис. 6.1, а, б, в). Наличие кольцевой камеры сглаживает возможную пульсацию и усредняет давление по периметру трубы.

К материалу диафрагмы и обработке ее поверхности предъявляются повышенные требования. Диск обычно изготавливается из нержавеющей стали, а кольцевые камеры – из углеродистой. Кромка отверстия диска у входа потока должна быть острой, без вмятин и заусенцев.

Из рассмотренных сужающих устройств диафрагма, хотя и отличается простотой конструкции, имеет наибольшие гидравлические сопротивления. Кроме того, по мере износа острой кромки отверстия коэффициент расхода ее изменяется. Сопла более стойки к стиранию и менее подвержены загрязнению, поэтому тарировочные характеристи-

ки их более стабильны в эксплуатации. Но они более сложны в изготовлении и дороги. Сопло Вентури дает наименьшие потери давления.

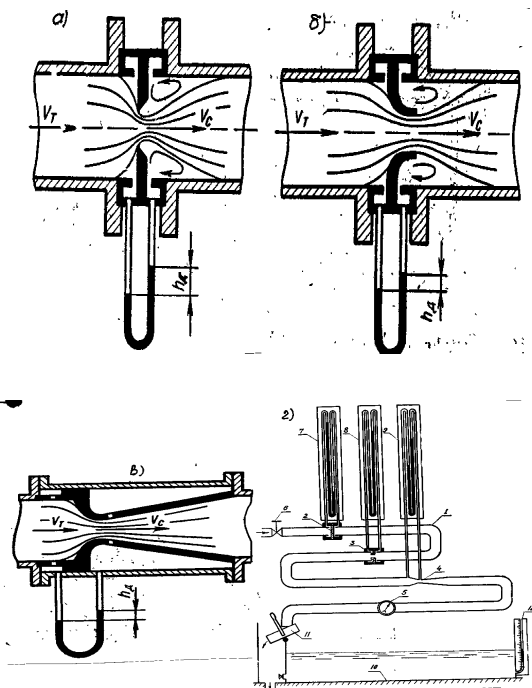


Рис. 6.1. Схема сужающих устройств и опытной установки:
 а – диафрагма; б – сопло; в – труба Вентури; г – опытная установка

Счетчики жидкости бывают скоростные и объемные. В скоростном счетчике жидкость вращает винт, расположенный соосно потоку (водомеры типа ВВ, ВТ), или крыльчатку, расположенную тангенциально потоку (водомеры ВКОС, УВК). Это вращение через червячную пару передается счетному механизму. Показание последнего (в м^3) пропорционально числу оборотов данного вращающегося устройства.

Принцип действия объемного счетчика основан на регистрации количества определенных объемов жидкости, вытесняемых из измерительной камеры прибора под действием разности давлений. Например, отсчет объемов в счетчике типа ШЖ (шестеренном, жидкостном) выполняется двумя овальными шестернями, находящимися в постоянном зацеплении и вращающимися под действием разности давлений на

входе и выходе прибора. За один оборот обе шестерни проталкивают объем жидкости, равный объему измерительной камеры. Чтобы не выводить ось шестерни за пределы камеры и тем самым избежать дополнительных потерь давления на трение в сальниковых уплотнениях, вращение от нее передается счетному механизму с помощью магнитной муфты.

Задачи исследования:

1) изучить конструкции приборов для измерения расхода и количества жидкости;

2) по результатам опытов, выполненных при различных расходах, построить зависимость (график тарировки) $Q = \Phi(h)$ для одного из расходомеров (по заданию преподавателя);

3) определить для каждого опыта коэффициент расхода, проанализировать его полученные значения.

Лабораторная установка. Установка (рис. 6.1, з) состоит из трубы 1 постоянного сечения, по длине которой вмонтированы сужающие устройства: диафрагма 2, сопло 3, труба Вентури 4 и счетчик-водомер 5 (скоростной, типоразмер ВВ-50). Расход в трубопроводе регулируется задвижкой 6. Перепад давления в сужающих устройствах 2, 3, 4 измеряется дифференциальными манометрами 7, 8, 9. Расход жидкости, протекающий в трубопроводе 1, определяется с помощью мерного резервуара 10. При этом желоб 11 наклоняется в сторону мерного резервуара 10 и по пьезометру 12 определяется глубина его наполнения за время t опыта.

Проведение опытов. Из-за ограниченности лабораторного занятия во времени всего проводится 4–5 опытов, различающихся между собой расходами. Опыт выполняется в приведенном ниже порядке.

1. Задвижкой 6 устанавливается небольшой расход.

2. После стабилизации уровней жидкости в дифманометрах записывается показание дифманометра h_d исследуемого сужающего устройства.

3. Определяется время t наполнения мерного бака объемом W .

4. Определяется время t_c протекания объема W_c через счетчик ВВ-50.

Далее задвижкой 6 увеличивается расход и выполняется аналогично каждый следующий опыт. Последний опыт проводится при полностью открытой задвижке.

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 6.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 6.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Диафрагма					Сопло					Трубка Вентури					Расходомер ВВ-50								
		Номера опытов																							
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1. Диаметр трубы d_1	см																								
2. Площадь сечения ω_1	см ²																								
3. Диаметр сужения d_2	см																								
4. Площадь сужения ω_2	см ²																								
5. Показание дифманометра h_d	см																								
6. Перепад давления h	см																								
7. Расход, вычисленный по формуле, Q_f	см ³ /с																								
8. Объем по расходомеру ВВ-50 W_c	см ³																								
9. Время протекания измеренного объема t_c	с																								
10. Расход по расходомеру ВВ-50 Q_c	см ³ /с																								
11. Показание пьезометра на мерном резервуаре h_m	см																								
12. Объем воды в мерном резервуаре W	см ³																								
13. Время наполнения мерного резервуара t	с																								
14. Замеренный расход Q	см ³ /с																								
15. Коэффициент расхода μ	—																								

Обработка результатов.

1. По известным диаметрам d_1 и d_2 вычисляются соответственно площади сечений ω_1 и ω_2 заданного сужающего устройства, а по ним – постоянная A .

2. Вычисляется для каждого опыта теоретический расход:

$$Q_T = A\sqrt{h_d} \quad (6.8)$$

и действительный расход объемным способом:

а) по мерному резервуару $Q = W/t$;

б) по счетчику-водомеру $Q_c = W_c/t_c$.

3. Вычисляется коэффициент расхода сужающего устройства:

$$\mu = Q / Q_T. \quad (6.9)$$

Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип измерения расхода с помощью сужающего устройства.

2. Как определяется разность потенциальных напоров в сужающих устройствах?

3. Как определить расход с помощью счетчика жидкости?

Лабораторная работа 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ВОДОМЕРА ВЕНТУРИ

При движении потока через сужающее устройство создается перепад потенциальной энергии (напора), обусловленный разностью площадей сечений ω_1 самого трубопровода и ω_2 сужающего устройства. Между расходом Q и перепадом потенциальной энергии существует определенная зависимость, которая может быть получена с помощью уравнения Бернулли и уравнения неразрывности (сплошности) движения для сечений I–I и II–II (рис. 7.1), выбранных соответственно перед сужающим устройством и в месте наибольшего сужения потока. Запишем уравнение Бернулли:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{тр}. \quad (7.1)$$

Изменение удельной потенциальной энергии обозначим через h , т. е.

$$h = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right), \quad (7.2)$$

тогда

$$h = \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_{тр}. \quad (7.3)$$

Далее продолжим вывод для идеальной жидкости ($h_{тр} = 0$) и при условии, что $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,0$. Так как согласно уравнению неразрывности потока $V_1 = V_2 \omega_2 / \omega_1$ из уравнения (7.3) получим теоретические значения скорости и расхода в трубопроводе:

$$V_2 = \sqrt{2g / (1 - \omega_2^2 / \omega_1^2)} \sqrt{h}; \quad (7.4)$$

$$Q_r = \omega_2 V_2 = \omega_2 \sqrt{2g / (1 - \omega_2^2 / \omega_1^2)} \sqrt{h}. \quad (7.5)$$

При прохождении реальной (вязкой) жидкости через сужающее устройство часть энергии ее теряется. Поэтому применительно к ней уравнение (7.5) будет давать завышенный результат. Необходимо ввести поправочный коэффициент $\mu = Q / Q_r$, который называется коэффициентом расхода. Учитывая его, можно определить действительный расход жидкости:

$$Q = \mu A \sqrt{h}, \quad (7.6)$$

где

$$A = \omega_2 \sqrt{2g / (1 - \omega_2^2 / \omega_1^2)} \quad (7.7)$$

есть постоянная Вентури.

Задачи исследования:

- 1) изучить конструкцию водомера Вентури;
- 2) определить для каждого опыта коэффициент расхода и проанализировать его полученные значения;
- 3) по результатам опытов, выполненных при различных расходах, построить тарировочный график $Q = f(h)$ водомера Вентури.

Лабораторная установка. Установка состоит из водомера Вентури (рис. 7.1) и двух пьезометров. Один из них присоединен перед сужени-

ем, а второй – в узком сечении. Водомер вмонтирован в трубопровод и является одним из его элементов. В конце трубопровода имеется свободный выход воды, позволяющий определять расход объемным способом. Изменение расхода в трубопроводе производится задвижкой K .

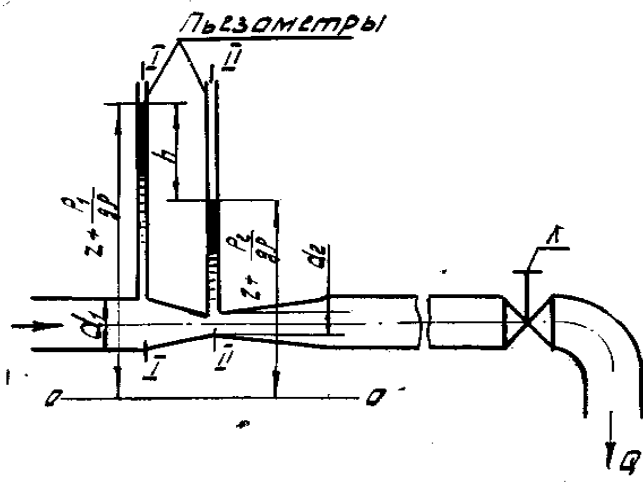


Рис. 7.1. Схема водомера Вентури

Проведение опытов. В работе проводится 5–6 опытов, различающихся между собой расходами. Опыт выполняется в приведенном ниже порядке.

1. Задвижкой K на трубопроводе устанавливается небольшой (минимальный) расход.
2. После стабилизации уровней жидкости в пьезометрах записываются их показания.
3. Определяется время t наполнения мерного бака объемом W и с помощью весов определяется масса воды m в нем.

Далее задвижкой K увеличивается расход и выполняется аналогично каждый следующий опыт. Последний опыт проводится при полностью открытой задвижке.

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 7.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 7.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов					
		1	2	3	4	5	6
1. Показание первого пьезометра p_1 ρg	см						
2. Показание второго пьезометра p_2 ρg	см						
3. Разность показаний h	см						
4. Объем воды в мерном баке W	см ³						
5. Время наполнения мерного бака t	с						
6. Замеренный расход $Q_{\text{ф}}$	см ³ /с						
7. Расход, вычисленный по формуле, $Q_{\text{т}}$	см ³ /с						
8. Коэффициент расхода водомера μ	—						

Постоянные величины: диаметр трубопровода $d_1 = \dots$ см; диаметр горловины $d_2 = \dots$ см; постоянная водомера $A = \dots$ см^{2,5}/с.

Обработка результатов.

1. Определяется разность показаний пьезометров h .
2. Вычисляется действительный расход Q .
3. По формуле (7.7) вычисляется постоянная водомера A .
4. Находится теоретический расход $Q_{\text{т}}$ по формуле (7.5).
5. Вычисляется коэффициент расхода $\mu = Q / Q_{\text{т}}$.
6. Находится среднее арифметическое значение коэффициента расхода $\mu = \sum \mu_i / n$.
7. Строится тарировочный график зависимости $Q = f(h)$.

Контрольные вопросы

1. Как изменяется удельная потенциальная и кинетическая энергия вдоль водомера?
2. От чего зависит постоянная водомера A ?
3. Что учитывается коэффициентом расхода водомера?

Лабораторная работа 8. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Наблюдения за поведением частиц жидкости при ее движении позволили установить два вида движения жидкости, которые различаются разными зависимостями сил трения от скорости движения (Д. И. Менделеев, 1880). В дальнейшем поведение частиц жидкости при их движении будем называть режимом движения. Это ламинарный (слоистый) и турбулентный (беспорядочный) виды движения.

При ламинарном режиме все струйки движутся параллельно друг другу без заметного перемешивания слоев. Такое течение наблюдается в диапазоне сравнительно малых скоростей. Это легко видеть, если в поток жидкости, протекающей в стеклянной трубе, ввести окрашенную струйку с плотностью, близкой к окружающей жидкости. При ламинарном режиме движения подкрашенная струйка будет выделяться, не смешиваясь с основным потоком, по всей длине стеклянной трубы.

Если же постепенно увеличивать расход, то при некоторой возросшей скорости траектория струйки становится волнистой. Если после этого еще более увеличивать скорость, то подкрашенная струйка полностью рассеивается в основной массе движущегося потока. В этом случае наблюдавшееся ранее ламинарное движение переходит в турбулентное.

При постепенном уменьшении скорости движения потока явление повторяется в обратном порядке. Однако переход от турбулентного режима к ламинарному происходит при скорости, меньшей той, при которой наблюдается переход от ламинарного движения к турбулентному. Скорость потока, при которой происходит смена режима движения жидкости, называется *критической*. Исследованиями О. Рейнольдса было выявлено существование двух критических скоростей: одной – при переходе ламинарного режима в турбулентный режим, она называется верхней критической скоростью $V_{в.кр}$, другой – при переходе турбулентного режима в ламинарный режим, она называется нижней критической скоростью $V_{н.кр}$. Исследованиями также доказано, что значение верхней критической скорости зависит от внешних условий опыта: постоянства температуры, уровня вибрации опытной установки и т. д. Нижняя критическая скорость в широком диапазоне изменения внешних условий остается практически неизменной. Опытами было установлено, что нижняя критическая скорость для потока в кругло-

цилиндрической трубе пропорциональна кинематической вязкости ν исследуемой жидкости и обратно пропорциональна диаметру трубы d :

$$V_{н.кр} = Kv / d. \quad (8.1)$$

Коэффициент пропорциональности K оказался одинаковым для различных V и d :

$$K = V_{н.кр} d / \nu. \quad (8.2)$$

В честь О. Рейнольдса этот коэффициент был назван критическим числом Рейнольдса и обозначен $Re_{кр}$.

Для любого потока по известным V , d , ν можно составить и вычислить число Рейнольдса:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (8.3)$$

и сравнить его с критическим значением $Re_{кр}$. Если $Re < Re_{кр}$, то $V < V_{н.кр}$ и режим движения жидкости ламинарный; если $Re > Re_{кр}$, то $V > V_{н.кр}$ и режим движения, как правило, турбулентный.

Так как переход от устойчивого ламинарного режима к устойчивому турбулентному движению жидкости не происходит мгновенно, то в некотором диапазоне скоростей намечается переходный режим, который принято относить к турбулентному.

В общем случае число Рейнольдса определяется безразмерным комплексом

$$Re = \frac{Vl}{\mu / \rho} = \frac{Vl}{\nu}, \quad (8.4)$$

составленным из четырех величин: динамической вязкости μ , плотности жидкости ρ , характерного геометрического размера живого сечения l и средней скорости потока V .

Поскольку характерный размер живого сечения выбирается произвольно, число Рейнольдса имеет индекс, указывающий выбранную линейную величину. Чаще всего в качестве характерных линейных величин принимают диаметр трубы d , гидравлический радиус R или глубину потока в открытом русле (канале) h . Тогда

$$Re_d = Vd / \nu; \quad Re_R = VR / \nu; \quad Re_h = Vh / \nu. \quad (8.5)$$

Число Re_d в учебной и справочной литературе обычно обозначается без индекса.

Критическое число Рейнольдса для потоков, в которых в качестве характерной линейной величины принят гидравлический радиус R , составляет

$$Re_{крR} = V_{н.кр} R / \nu = 580.$$

Задачи исследования:

- 1) установить визуально наличие ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости;
- 2) вычислить по результатам каждого опыта критерий Рейнольдса и дать заключение о режиме движения жидкости.

Лабораторная установка. Установка состоит из напорного резервуара 4 (рис. 8.1), стеклянной трубы 5, сливной воронки для поддержания постоянного напора, зажимов 3 и 6 на резиновых трубках, регулирующих подачу жидкости в приборе, трубки 1 для ввода в стеклянную трубу подкрашенной струйки, колбы 2 с окрашенной жидкостью и напорной линии с вентилем, с помощью которых производится подача жидкости в резервуар.

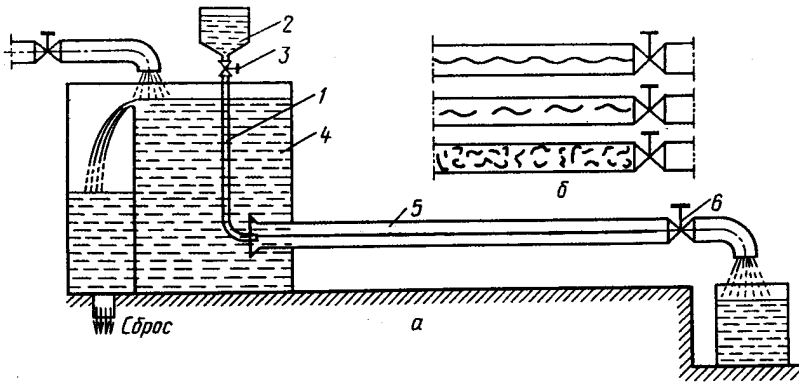


Рис. 8.1. Схема опытной установки

Проведение опытов. В работе выполняются четыре опыта, различающихся между собой режимом движения потока в стеклянной трубе.

Порядок проведения опытов приведен ниже.

1. Устанавливаем такую подачу воды, чтобы уровень жидкости в резервуаре 4 сохранялся постоянным, при этом должен быть небольшой перелив через сливную воронку.

2. Производится небольшое открытие зажима 6, и в стеклянную трубку 5 подается подкрашенная струйка.

3. По визуальным наблюдениям за поведением подкрашенной струйки устанавливается режим движения жидкости.

4. Определяется время t наполнения мерного цилиндра и объем жидкости W .

5. Замеряется температура T жидкости и по табл. 1 приложения устанавливается кинематическая вязкость воды.

Поддерживая постоянный уровень жидкости в резервуаре 1 и постепенно увеличивая расход, опыты повторяют. Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 8.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 8.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов			
		1	2	3	4
1. Объем воды в мерном цилиндре W	см ³				
2. Время наполнения мерного цилиндра t	с				
3. Расход Q	см ³ /с				
4. Средняя скорость V	см/с				
5. Температура воды T	°C				
6. Кинематический коэффициент вязкости ν	см ² /с				
7. Число Рейнольдса Re	–				
8. Режим движения: наблюдаемый вычисленный	– –				

Постоянные величины: диаметр трубы $d = \dots$ см; площадь сечения трубы $\omega = \dots$ см².

Обработка результатов.

1. Определяется площадь сечения трубы 5, расход $Q = W/t$ и средняя скорость потока $V = Q/\omega$.

2. Вычисляется число Рейнольдса по зависимости (8.3).

3. Сопоставляются полученные во всех опытах числа Рейнольдса с критическим $Re_{кр} = 2320$ и устанавливается режим движения жидкости.

4. Эти результаты сопоставляются с визуальными наблюдениями и дается заключение о соответствии критерия Рейнольдса данным опытов.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют режимы движения жидкости и чем они отличаются?
2. Как определяется режим движения с помощью критерия Рейнольдса?
3. Какие факторы влияют на режим движения жидкости?

Лабораторная работа 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Местными гидравлическими сопротивлениями называются элементы трубопроводов, каналов, в которых потери энергии происходят за счет деформации потока и вызваны изменением размеров или их конфигурации. Причинами этих потерь являются изменение скорости, отрыв транзитного потока от стенок и вихреобразование. В местном гидравлическом сопротивлении часть механической энергии, которой обладает поток, переходит в тепло и рассеивается в нем.

К простейшим местным сопротивлениям относятся внезапные или постепенные расширения, сужения и повороты канала, трубопровода. Более сложные сопротивления (например, вентиль, клапан и др.) представляют собой соединения или комбинации перечисленных простейших сопротивлений.

Потери напора в любом местном сопротивлении можно определить по формуле Вейсбаха:

$$h_M = \zeta_{M1} \frac{V_1^2}{2g} = \zeta_{M2} \frac{V_2^2}{2g}, \quad (9.1)$$

где ζ_{M1} – коэффициент местного гидравлического сопротивления, определенный по скорости V_1 в трубе перед местным гидравлическим сопротивлением;

ζ_{M2} – коэффициент местного гидравлического сопротивления, определенный по скорости V_2 в трубе за местным гидравлическим сопротивлением.

Для простоты пользования литературными источниками по определению коэффициентов местных гидравлических сопротивлений их значения всегда приводятся по скорости V_2 в трубе за местным сопротивлением.

Тогда

$$h_m = \zeta_m \frac{V_2^2}{2g}. \quad (9.2)$$

Как видно из формулы (9.2), коэффициент ζ_m – величина безразмерная. Он представляет собой ту часть кинетической энергии, которая теряется в местном гидравлическом сопротивлении.

Обычно коэффициент ζ_m определяется опытным путем и приводится в справочной литературе в виде таблиц, графиков, эмпирических формул. Теоретические зависимости получены лишь для ζ_m некоторых местных сопротивлений. Экспериментальное определение сводится к вычислению его из уравнения (9.2) по полученным опытным путем значениям h_m и V_2 . При этом местные потери напора h_m находятся из уравнения Бернулли:

$$h_m = H_1 - H_2,$$

где H_1 и H_2 – полные напоры в сечениях I – I и II – II (рис. 9.1).

Для подсчета полных напоров используются показания пьезометров и полученные опытным путем величины скорости потока на входе и выходе местного сопротивления:

$$H_1 = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}, \quad (9.3)$$

$$H_2 = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}. \quad (9.4)$$

В случае, когда местное сопротивление расположено на горизонтальном участке трубопровода постоянного сечения, потери напора в нем равны разности показаний пьезометров на входе и выходе:

$$h_m = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g}. \quad (9.5)$$

Задачи исследования:

1) провести на лабораторной установке необходимые опыты и определить коэффициенты $\zeta_m^{\text{оп}}$ нескольких местных сопротивлений (по указанию преподавателя);

2) найти в справочных материалах коэффициенты $\zeta_{мг}$ для аналогичных местных сопротивлений для условий опытов;

3) сравнить полученные опытные величины со справочными.

Лабораторная установка. Установка (рис. 9.1) состоит из трубопровода 1, на котором последовательно расположены местные гидравлические сопротивления: внезапное расширение 2, внезапное сужение 3, колено 4, задвижка 5, диффузор 6, конфузор 7 и кран 8, и пьезометров на входе и выходе каждого сопротивления. В трубопровод поступает вода из резервуара, в котором поддерживается постоянный уровень. Для регулирования расхода на конце трубопровода установлен вентиль 9.

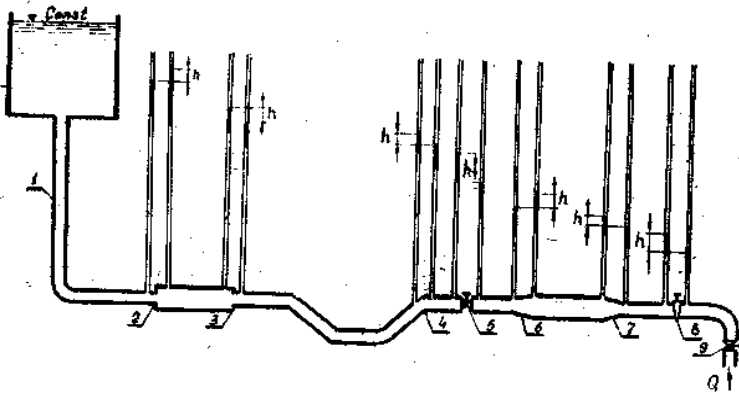


Рис. 9.1. Схема опытной установки

Проведение опытов.

1. Выписываются из технической характеристики лабораторной установки величины внутренних диаметров труб, замеряются угол поворота колена, степень открытия задвижки, угол открытия крана, длина диффузора и конфузора (для определения угла конусности). Результаты записываются в табл. 9.1.

2. Вентилем устанавливается в трубопроводе постоянный расход, который измеряется весовым способом (с помощью мерного бака, секундомера и весов) при установившемся движении потока.

3. Снимаются показания пьезометров на входе и выходе каждого из указанных местных сопротивлений.

Результаты измерений и вычислений по проведенным опытам записываются в табл. 9.2 журнала лабораторных работ.

Таблица 9.1. Параметры изучаемых местных сопротивлений

Местное сопротивление		d_1 , см	ω_1 , см ²	d_2 , см	ω_2 , см ²	Другие пара- метры
Наименование	Схема					
Внезапное расширение						
Внезапное сужение						
Колено						
Задвижка						
Диффузор						
Конфузор						
Кран						

Таблица 9.2. Измеренные и вычисленные показатели

Наименование	Единица измерения	Внезапное расширение	Внезапное сужение	Колено	Задвижка	Диффузор	Конфузор	Кран
1. Скорость потока перед сопротивлением V_1	см/с							
2. Скоростной напор перед сопротивлением $V_1^2/(2g)$	см							
3. Скорость потока за сопротивлением V_2	см/с							
4. Скоростной напор за сопротивлением $V_2^2/(2g)$	см							
5. Показание пьезометра перед сопротивлением $P_1 / (\rho g)$	см							
6. Показание пьезометра за сопротивлением $P_2 / (\rho g)$	см							
7. Полный напор H_1	см							
8. Полный напор H_2	см							
9. Потери напора h_m	см							
10. Коэффициент местного гидравлического сопротивления: опытный $\zeta_m^{оп}$ табличный $\zeta_m^т$	— —							
11. Относительная разность $\Delta\zeta_m$	%							

Постоянные величины: время наполнения мерного бака $t = \dots$ с; объем воды в мерном баке $W = \dots$ см³; расход воды в трубопроводе $Q = \dots$ см³/с.

Обработка результатов.

1. Вычисляются расход в трубопроводе $Q = W/t$, площади и средние скорости потока на входе и выходе исследуемых местных сопротивлений $V_1 = Q/\omega_1$ и $V_2 = Q/\omega_2$.

2. По формуле (9.4) определяются напоры на входе и выходе каждого местного сопротивления, а по (9.3) – потери напора.

3. Опытный коэффициент местного сопротивления определяется из формулы (9.2):

$$\zeta_{\text{м}}^{\text{оп}} = \frac{h_{\text{м}}}{V_2^2 / (2g)}. \quad (9.6)$$

4. Полученные опытные значения $\zeta_{\text{м}}^{\text{оп}}$ сопоставляются с приведенными в литературе $\zeta_{\text{м}}^{\text{т}}$ (табл. 2 приложения).

Контрольные вопросы

1. Что называется местным сопротивлением?
2. Почему возникают потери напора в местных сопротивлениях?
3. Как определить потери напора или потери давления в местном сопротивлении?
4. Какой физический смысл имеет коэффициент местного сопротивления?

Лабораторная работа 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ

Потери удельной энергии (напора) по длине потока в напорном трубопроводе круглого сечения определяются по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{V^2}{2g}, \quad (10.1)$$

- где λ – гидравлический коэффициент трения (коэффициент Дарси);
 ℓ – длина участка трубопровода, на котором определяются потери напора;
 d – внутренний диаметр трубопровода;
 V – средняя скорость движения потока.

Многочисленными исследованиями установлено, что гидравлический коэффициент трения зависит от числа Рейнольдса ($Re = Vd / \nu$, где ν – кинематическая вязкость жидкости), диаметра и так называемой эквивалентной величины выступов (Δ_s) шероховатости трубопровода. Однако в разных условиях движения потоков влияние этих факторов сказывается по-разному и прежде всего – режима движения жидкости. Поэтому влияние их на гидравлический коэффициент трения рассмотрим отдельно для каждого режима.

Ламинарный режим движения. Как отмечалось в работе 8, ламинарный поток имеет слоистый характер – частицы жидкости движутся с различными скоростями параллельно оси трубы без перемешивания. Касательные напряжения, которые возникают между смещающимися параллельными слоями жидкости, обусловлены вязкостью жидкости и подчиняются закону жидкостного трения Ньютона, который имеет следующую запись:

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dr}, \quad (10.2)$$

где τ – касательное напряжение;

μ – динамическая вязкость жидкости;

du/dr – градиент скорости.

Используя общий закон распределения касательных напряжений

$$\tau = \rho g R I, \quad (10.3)$$

где ρ – плотность жидкости;

g – ускорение свободного падения;

R – гидравлический радиус потока;

I – гидравлический уклон $I = h_{дл}/\ell$. Выражая в нем τ формулой (10.2), получим дифференциальное уравнение, определяющее скорость u как функцию радиуса r трубопровода:

$$du = - \frac{\rho g I}{2\mu} r dr. \quad (10.4)$$

В результате интегрирования этого уравнения с учетом граничного условия ($u = 0$ при $r = r_0$, где r_0 – радиус трубопровода) получаем параболический закон распределения скорости (рис. 10.1) по сечению.

$$u = \frac{\rho g I}{4\mu} (r_0^2 - r^2). \quad (10.5)$$

Максимальная скорость будет на оси трубы:

$$u_{\max} = \frac{\rho g I}{4\mu} r_0^2. \quad (10.6)$$

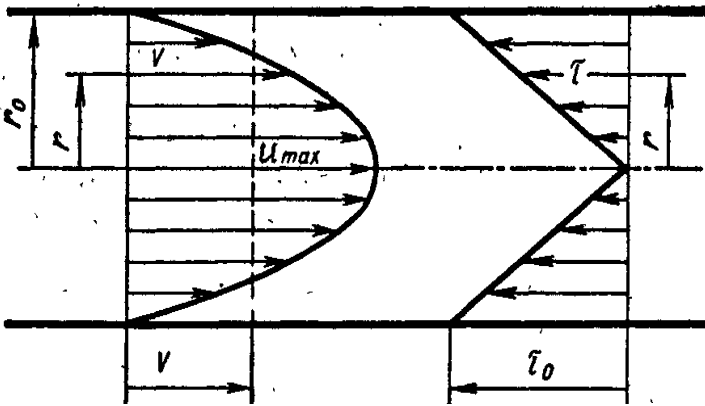


Рис. 10.1. Распределение скоростей и касательных напряжений по сечению ламинарного потока в круглой трубе

Используя выражение (10.6), можно представить найденный закон в форме

$$u = u_{\max} (1 - r^2 / r_0^2). \quad (10.7)$$

Определив расход жидкости суммированием расходов через элементарные кольцевые площадки живого сечения потока, найдем его среднюю скорость:

$$V = \frac{Q}{\pi r_0^2} = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} u_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right) 2\pi r dr = \frac{u_{\max}}{2}. \quad (10.8)$$

Следовательно, средняя скорость потока равна половине максимальной.

Решая совместно уравнения (10.6) и (10.8), получаем закон гидравлического трения в потоке при ламинарном режиме (формула Пуазейля)

$$h_{\text{дл}} = \frac{32\nu\ell V}{gd^2}, \quad (10.9)$$

из которого следует, что потери напора на трение по длине потока пропорциональны средней скорости движения потока и кинематической вязкости жидкости.

Приведя последнюю формулу к виду (10.1), получим гидравлический коэффициент трения для ламинарного потока:

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (10.10)$$

Таким образом, при ламинарном режиме движения жидкости, когда $Re = \frac{Vd}{\nu} \leq Re_{\text{кр}} = 2320$, гидравлический коэффициент трения λ определяется по формуле (10.10). Теоретические результаты хорошо подтверждаются опытом для изотермических потоков, в которых отсутствует теплообмен с окружающей средой.

Турбулентный режим движения. Турбулентный поток характеризуется беспорядочным, хаотичным движением частиц жидкости. Наряду с основным поступательным перемещением жидкости вдоль трубы наблюдаются незакономерные поперечные перемещения и вращательные движения (завихривания) частиц, которые приводят к интенсивному перемешиванию жидкости.

Измерения скоростей в различных точках потока чувствительными самопишущими приборами обнаруживают *пульсации* скоростей, т. е. весьма быстрые и беспорядочные их колебания около некоторых средних значений, которые называют *осредненными* местными скоростями. На рис. 10.2 изображены пульсации продольной скорости в определенной точке потока.

За осредненную скорость в данной точке принимают такое постоянное значение скорости, при котором через любую площадку, содержащую эту точку, за время осреднения проходит объем жидкости, равный истинному; таким образом, проекция осредненной скорости на некоторое направление s определяется по формуле

$$u = \frac{1}{T} \int_0^T u_s dt, \quad (10.11)$$

где T – период осреднения;

u_s – проекция мгновенной местной скорости на это направление.

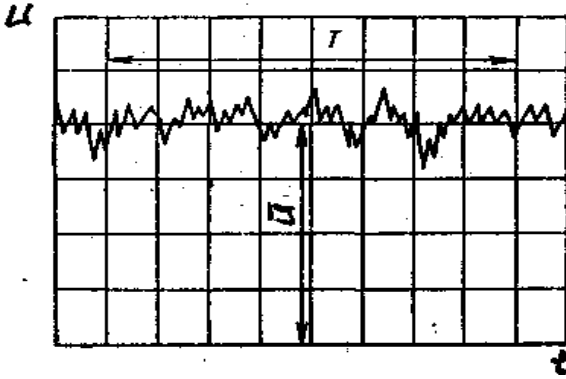


Рис. 10.2. Пульсации продольной скорости в турбулентном потоке

При достаточно большом периоде осреднения (по сравнению со средним периодом пульсаций, который обычно измеряется сотыми и тысячными долями секунды) величина u_s оказывается практически не зависящей от T ; в этом проявляется основная статистическая закономерность турбулентного потока.

Аналогичным образом происходят пульсации давлений и касательных напряжений в различных точках потока. Следовательно, турбулентный поток является по своей природе неустановившимся движением.

Так как пульсации имеют беспорядочный, случайный характер, установить зависимости между мгновенными характеристиками потока оказывается невозможным. Вместе с тем для большинства технических задач существенны не мгновенные пульсирующие величины местных скоростей и напряжений, а лишь их осредненные во времени значения. Поэтому при гидравлических расчетах турбулентных потоков обычно пользуются их осредненными характеристиками.

Замена действительного неустановившегося движения более простой схемой осредненного установившегося потока чрезвычайно облегчает изучение турбулентного потока, сохраняя вместе с тем его главные закономерности.

Измерения скоростей показывают, что при переходе к турбулентному режиму у стенок сохраняется тонкий слой жидкости, в котором частицы, подторможенные и направленные стенками, сохраняют в основном слоистый характер движения (так называемый ламинарный, или вязкий, подслой). Поэтому профиль осредненных скоростей имеет два значительно различающихся участка (рис. 10.3). В турбулентном ядре благодаря интенсивному поперечному перемешиванию, приводящему к выравниванию скоростей частиц, осредненные скорости отличаются незначительно и их распределение по основной части сечения оказывается более равномерным, чем при ламинарном режиме. В пределах вязкого подслоя происходит весьма резкое падение скоростей до нулевого значения на стенке.

Следует заметить, что поток внутри вязкого подслоя не является строго ламинарным, так как в нем существуют небольшие турбулентные пульсации скоростей и давлений и возникают периодические обмены с внешними турбулизированными слоями.

Толщина вязкого подслоя, который еще называется ламинарной пленкой δ (рис. 10.3), чрезвычайно мала (сотые и тысячные доли диаметра трубопровода) и определяется по зависимости

$$\delta = \frac{30d}{Re\sqrt{\lambda}}. \quad (10.12)$$

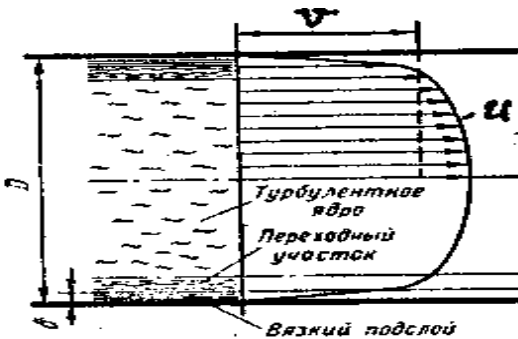


Рис. 10.3. Схема распределения осредненных скоростей в турбулентном потоке

Между турбулентным ядром и вязким подслоем имеется тонкий переходный участок, в котором по мере приближения к подслою резко уменьшаются турбулентные пульсации и интенсивно уменьшаются осредненные скорости. Так как характеристики потока изменяются по радиусу непрерывно, установить границы между этими участками можно только условно.

Переход потока в турбулентное состояние приводит к сильному возрастанию сопротивления, что связано с увеличением напряжений трения. В турбулентном ядре, где градиенты осредненной скорости невелики, напряжения вязкостного трения играют незначительную роль. Основная часть сопротивления создается так называемыми турбулентными касательными напряжениями, которые возникают из-за непрерывных поперечных перемещений (беспорядочного перемешивания) частиц. Обмен частицами между соседними слоями сопровождается соответствующим увеличением или уменьшением количества движения этих частиц (турбулентный обмен количеством движения). Так как при этом более быстрые слои тормозятся, а более медленные ускоряются, то между ними возникает динамическое взаимодействие, которое проявляется в виде турбулентных касательных напряжений.

Наибольшие турбулентные касательные напряжения возникают вблизи стенок у внешней границы турбулентного ядра. На этом участке наиболее интенсивно образуются вихри, которые затем рассеиваются в турбулентном ядре и гасятся силами вязкостного трения. Энергия вращения вихрей переходит при этом в тепло.

Точной теории турбулентного движения ввиду большой сложности его структуры в настоящее время не существует. Поэтому основную роль при изучении этого движения и при разработке практических методов расчета играют опытные данные. В результате многочисленных опытных исследований установлено, что свойства турбулентного потока (распределение осредненных скоростей по сечению, коэффициент сопротивления трения и др.) зависят от числа Re и относительной шероховатости стенок трубопровода.

По характеру и степени влияния этих факторов при турбулентном режиме различают зоны *гидравлически гладких* и *гидравлически шероховатых труб*, разделенные *переходной* зоной.

В зоне гидравлически гладких труб (рис. 10.4, *a*) толщина δ вязкого подслоя значительно больше максимальной высоты бугорков шерохо-

ватости $(\delta) \Delta_{\max}$) или числа Рейнольдса, которое находится в интервале $2320 < Re \leq Re_{\text{гл}}$:

$$Re_{\text{гл}} = 27 \left(\frac{d}{\Delta_3} \right)^{1,14}, \quad (10.13)$$

или приближенно

$$Re_{\text{гл}} = 20d / \Delta_3, \quad (10.14)$$

где Δ_3 – эквивалентная величина выступов шероховатости, пояснение которой будет дано ниже.

При этом бугорки утоплены в вязком подслое, плавно обтекаются с очень малыми скоростями и не влияют на распределение скоростей и потерь напора. Гидравлический коэффициент трения является функцией только числа Рейнольдса:

$$\lambda = f(Re).$$

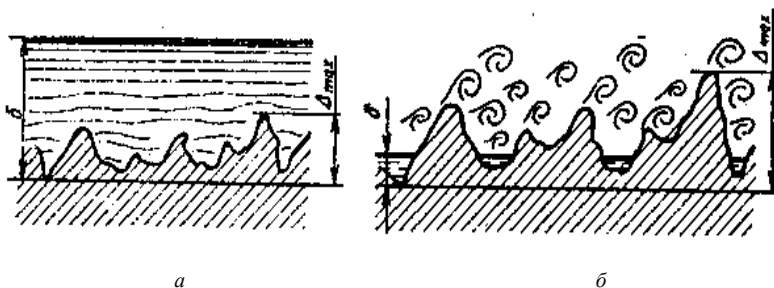


Рис. 10.4. Течение у стенок трубы при турбулентном режиме:
a – гидравлически гладкие трубы; *б* – гидравлически шероховатые трубы

Достаточно хорошо совпадают с опытом значения λ , вычисленные по формуле Конакова:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2}. \quad (10.15)$$

При $Re \leq 10^5$ применима также формула Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{1/4}}. \quad (10.16)$$

Пользуясь выражением (10.16), можно получить из общей формулы (10.1) следующую зависимость потери напора на трение от кинематической вязкости жидкости ν и средней скорости потока V для гидравлически гладких труб:

$$h_{дл} \sim \nu^{0,25} V_3^{1,75}.$$

Сравнение с ламинарным режимом (для которого $h_{дл} \sim \nu$) показывает, что при переходе к турбулентному режиму влияние вязкости на сопротивление значительно уменьшается, а значительно возрастает влияние скорости движения жидкости. Это объясняется тем, что в турбулентном потоке вязкостное сопротивление (пропорциональное первой степени скорости) сосредоточено лишь в пределах тонкого слоя у стенок. Основная часть сопротивления создается в результате перемешивания частиц жидкости в переходном участке и турбулентном ядре и связана с рассеиванием кинетической энергии вращения завихренных частиц, которая пропорциональна квадратам скоростей потока. В зоне гидравлически шероховатых труб (рис. 10.4, б) толщина δ вязкого подслоя значительно меньше высоты бугорков шероховатости ($\delta \ll \langle \Delta_{\text{max}} \rangle$) или числа Рейнольдса, которое находится в соотношении $Re \geq Re_{\text{KB}}$:

$$Re_{\text{KB}} = 21,6C \frac{d}{\Delta_3}, \quad (10.17)$$

или приближенно

$$Re_{\text{KB}} = 500 \frac{d}{\Delta_3}, \quad (10.18)$$

где C – коэффициент Шези, который может определяться по формуле И. И. Агроскина

$$C = \frac{1}{n} + 17,72 \ell g R, \quad (10.19)$$

где n – коэффициент шероховатости стенок трубопровода, который принимается по справочной литературе (табл. 3 приложения); R – гидравлический радиус. В формулу (10.19) подставляется только в метрах.

При этом бугорки выступов шероховатости почти целиком оказываются в турбулентном ядре потока. Обтекание бугорков происходит с большими скоростями и сопровождается интенсивными отрывами вихрей, которые попадают в центральную часть потока и усиливают его турбулентность. Рассеивание кинетической энергии вращения этих вихрей, происходящее в процессе перемешивания частиц и приводящее к переходу этой энергии в тепло, увеличивает потерю напора. Соответственно возрастает также и касательное напряжение на стенке, которое создается в основном в результате перепадов давлений, возникающих на бугорках при их отрывном обтекании.

Поскольку слоистое пристенное течение практически полностью разрушено, влияние сил вязкостного трения на поток становится исчезающе малым и характеристики потока оказываются независимыми от числа Рейнольдса (зона *турбулентной автоточности*). Гидравлический коэффициент трения является функцией только относительной шероховатости

$$\lambda = f(\Delta_s / d),$$

возрастая вместе с увеличением Δ_s / d . Потери напора в этой зоне не зависят от вязкости и пропорциональны квадрату средней скорости потока ($h_{\text{дл}} \sim V^2$), квадратичный закон сопротивления).

В этой зоне сопротивления гидравлический коэффициент трения может определяться по формуле Л. Прандтля

$$\lambda = 0,25 / (\lg 0,27 \frac{\Delta_s}{d})^2; \quad (10.20)$$

по формуле Б. Л. Шифринсона (при $\frac{\Delta_s}{d} < 0,007$)

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_s}{d}\right)^{0,25}, \quad (10.21)$$

а также по коэффициенту Шези

$$\lambda = \frac{8g}{C^2}. \quad (10.22)$$

В переходной зоне по мере возрастания числа Рейнольдса уменьшается толщина вязкого подслоя. При этом бугорки шероховатости начинают все более выступать за пределы вязкого подслоя, вызывая дополнительные вихреобразования и увеличивая потерю напора. Считается, что в этой зоне высота вязкого подслоя δ примерно равна высоте бугорков шероховатости Δ_{max} , т. е. ($\delta \approx \Delta_{\text{max}}$), или числу Рейнольдса, которое находится в интервале

$$Re_{\text{гл}} < Re < Re_{\text{кв.}}$$

Гидравлический коэффициент трения в этой зоне зависит от числа Рейнольдса и относительной шероховатости стенок

$$\lambda = f(Re, \Delta / d)$$

и может определяться по формуле А. Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_3}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}; \quad (10.23)$$

по формуле Френкеля

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[0,27 \frac{\Delta_3}{d} + \left(\frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} \right]. \quad (10.24)$$

Принятая в гидравлике методика определения Δ учитывает, что естественная шероховатость стенок трубопроводов всегда неоднородна (бугорки шероховатости имеют различные формы, размеры и расположение). Микрорельеф поверхности стенок зависит от нескольких факторов: материала, способа изготовления трубы, физико-химических свойств жидкости и срока эксплуатации (в связи с возможной коррозией стенок и образованием на них отложений).

Поскольку естественная шероховатость имеет многообразные нерегулярные формы (рис. 10.5, а), установить каким-либо геометрическим способом осредненное значение высоты бугорков, определяющее влияние шероховатости на потерю напора, оказывается невозможным. Поэтому параметр шероховатости вводится как условная величина, определяемая по специальной шкале искусственной однородной шероховатости (рис. 10.5, б).



Рис. 10.5. Естественная (а) и эквивалентная зернистая (б) шероховатости

Такая шкала построена с помощью калиброванных зерен песка, наклеиваемых на гладкую поверхность трубы. Набор таких труб при различном диаметре зерен Δ дает ряд значений относительной шероховатости Δ/d , в функции которой получены значения λ (формула Никурадзе):

$$\lambda = \frac{1}{(2\ell g d / \Delta + 1,14)^2}. \quad (10.25)$$

С помощью такой шкалы за абсолютную шероховатость стенок принимают *эквивалентную* шероховатость, представляющую собой такой размер зерен песка искусственной шероховатости, который в квадратичной зоне равноценен по гидравлическому сопротивлению данной неоднородной шероховатости. Эквивалентная шероховатость определяется путем испытаний данной трубы в квадратичной зоне сопротивления и вычисления Δ по опытному значению λ из формулы (10.22).

Для металлических труб эквивалентная шероховатость составляет 0,5–0,7 максимальной высоты бугорков естественной шероховатости.

Задачи исследования:

1) провести на лабораторной установке необходимые опыты и определить гидравлические коэффициенты трения при различных скоростях движения потока в трубопроводе;

2) вычислить коэффициенты λ для условий опытов по рекомендуемым выше формулам;

3) сопоставить полученные результаты (вычислить $\Delta\lambda$).

Лабораторная установка. Лабораторная установка (рис. 10.6) состоит из трубопровода 4 постоянного сечения, напорного резервуара 1, в котором поддерживается постоянный уровень воды. Расход в трубо-

проводе регулируется задвижкой 5. На прямолинейном горизонтальном участке трубопровода установлены на расстоянии l друг от друга пьезометры 2 и 3.

Проведение опытов.

1. Задвижкой 5 устанавливается постоянный небольшой расход, который измеряется весовым способом (с помощью мерного бака, секундомера и весов).

2. Измеряются температура воды T , расстояние между пьезометрами l , внутренний диаметр d трубопровода, снимаются показания пьезометров (после того, как они станут постоянными).

3. При увеличении расхода проводятся еще два аналогичных опыта.

Результаты измерений и обработки опытов записываются в табл. 10.1 журнала лабораторных работ.

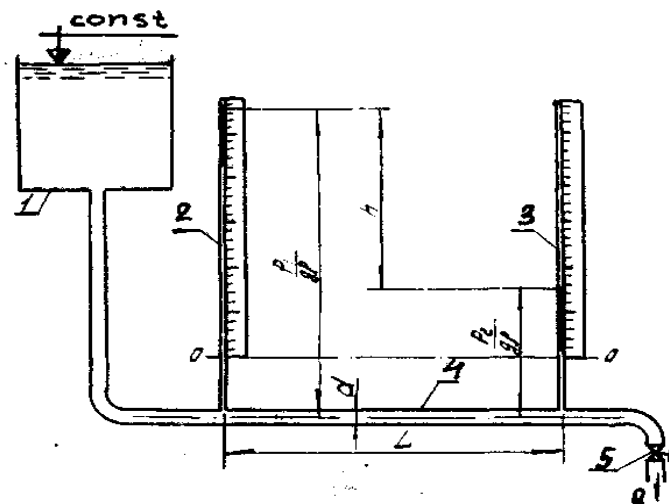


Рис. 10.6. Схема опытной установки

Таблица 10.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1	2	3	4	5
1. Диаметр трубы d	см			
2. Площадь сечения ω	см ²			

1	2	3	4	5
3. Объем воды в мерном баке W	см ³			
4. Время наполнения мерного бака t	с			
5. Расход Q	см ³ /с			
6. Средняя скорость V	см/с			
7. Показание первого пьезометра $\frac{P_1}{\rho g}$	см			
8. Показание второго пьезометра $\frac{P_2}{\rho g}$	см			
9. Потеря напора $h_{тр}$	см			
10. Расстояние между сечениями L	см			
11. Температура воды T	°C			
12. Кинематический коэффициент вязкости ν	Ст			
13. Число Рейнольдса Re	–			
14. Зона сопротивления	–			
15. Коэффициент Дарси: опытный $\lambda_{оп}$	–			
вычисленный $\lambda_{р}$	–			
16. Относительная разность $\Delta\lambda$	%			

Обработка результатов.

1. Вычисляются площадь сечения трубопровода, расход и средняя скорость потока.

2. Вычисляются потери напора по длине опытного участка трубопровода. Для горизонтального трубопровода постоянного сечения в соответствии с уравнением Бернулли

$$h_{дл} = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}. \quad (10.26)$$

3. Из формулы (10.1) определяется опытное значение гидравлического коэффициента трения.

4. С учетом того, что в опыте с самым большим расходом область гидравлического сопротивления квадратичная, из формулы Никурадзе (10.25) вычисляется величина Δ_3 путем подстановки в нее опытного значения гидравлического коэффициента трения.

5. Далее устанавливаются по вышеизложенным рекомендациям границы зон гидравлического сопротивления.

6. В зависимости от зоны сопротивления применяется расчетная формула для определения расчетной величины гидравлического коэффициента трения λ_p .

7. Вычисляется относительное отклонение λ_p от $\lambda_{оп}$.

Контрольные вопросы

1. Как определить опытным путем потери напора по длине в горизонтальном и наклонном трубопроводе?

2. Что такое гидравлический коэффициент трения?

3. От чего зависит коэффициент λ при ламинарном и турбулентном режимах движения жидкости?

Лабораторная работа 11. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ

При истечении жидкости из малого отверстия в тонкой стенке и насадков при постоянном напоре расход определяется по формуле

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_0}, \quad (11.1)$$

где μ – коэффициент расхода;

ω – площадь отверстия в тонкой стенке или насадка;

H_0 – расчетный напор.

Если жидкость вытекает из резервуара (рис. 11.1) при постоянном уровне H и давлении p_1 , то расчетный напор

$$H_0 = H + \frac{p_0 - p_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_0^2}{2g}, \quad (11.2)$$

где V_0 – средняя скорость движения жидкости в сечении 1–1 (рис. 11.1).

В частном случае, когда $p_1 = p_0$ и $V_0 = 0$, расчетный напор $H_0 = H$.

Коэффициент μ есть величина безразмерная. Он представляет собой отношение действительного расхода к тому расходу, который был бы в случае отсутствия сопротивлений и сжатия струи:

$$\mu = Q / (\omega \sqrt{2gH_0}). \quad (11.3)$$

Коэффициент расхода выражается через коэффициент сжатия струи и коэффициент скорости:

$$\mu = \varepsilon \varphi. \quad (11.4)$$

Коэффициент сжатия струи

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}, \quad (11.5)$$

где ω_c – площадь сжатого сечения струи после выхода ее из отверстия или насадка.

Для цилиндрического и коноидиального насадков $\varepsilon = 1,0$, т. е. струя не имеет сжатия на выходе. В случае конического сходящегося насадка коэффициент сжатия весьма близок к 1,0.

Коэффициент скорости

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \Sigma \zeta}}, \quad (11.6)$$

где α_c – коэффициент кинетической энергии в сжатом сечении струи;

$\Sigma \zeta$ – сумма коэффициентов сопротивлений на пути движения жидкости от резервуара до сжатого сечения.

Задачи исследования:

1) определить по результатам выполненных опытов коэффициенты расхода, сжатия, скорости при истечении жидкости из круглого отверстия в тонкой стенке, из внешнего цилиндрического и внешнего конического сходящегося насадков;

2) сопоставить полученные опытные коэффициенты с приведенными в литературе.

Лабораторная установка. Установка (рис. 11.1) состоит из резервуара 4, сливной воронки 2 для поддержания постоянного уровня H , фланца 5 со шпильками для крепления исследуемого насадка или диска 6 с отверстием, клапана 7 с рычагом 3 для перекрытия отверстия, пьезометра 1 для измерения H , задвижки 8 для регулировки расхода жидкости, поступающей в резервуар.

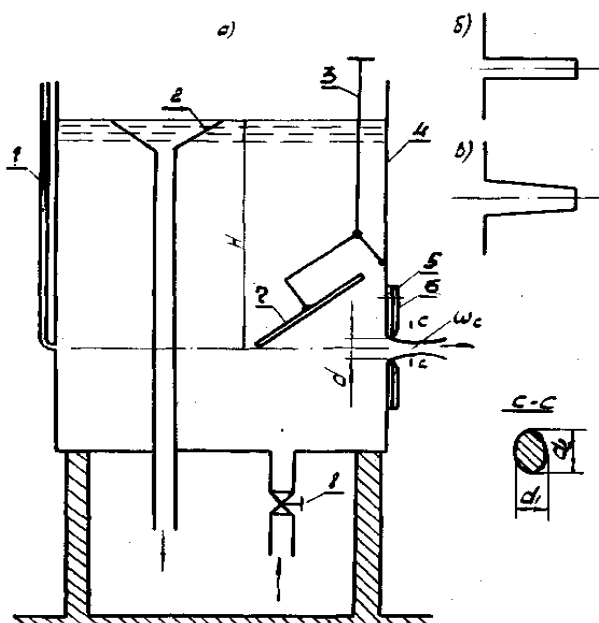


Рис. 11.1. Схема опытной установки:
a – общий вид; *б* – внешний цилиндрический насадок;
в – внешний конический сходящийся насадок;
с – сжатое сечение струи

Проведение опытов.

1. Резервуар наполняется водой, задвижкой 8 устанавливается такой расход, чтобы уровень в резервуаре был постоянным.
2. Измеряется диаметр отверстия.
3. Рычагом 3 открывается клапан 7.
4. Весовым способом измеряется расход истечения.
5. Штангенциркулем измеряются горизонтальный d_1 и вертикальный d_2 размеры струи в сжатом сечении.
6. По пьезометру 1 определяется геометрический напор H .
7. По мерной линейке определяется дальность L_x полета струи (на уровне пола).

Такие опыты проводятся с внешним цилиндрическим и коническим сходящимися насадками. Результаты измерений и вычислений записываются в табл. 11.1 журнала лабораторных работ.

Т а б л и ц а 11.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Круглое отверстие в тонкой стенке	Цилиндрический насадок	Конический сходящийся насадок
1. Диаметр отверстия d	см			
2. Площадь отверстия ω	см ²			
3. Объем воды в мерном баке W	см ³			
4. Время наполнения мерного бака t	с			
5. Расход Q	см ³ /с			
6. Напор над центром отверстия H	см			
7. Коэффициент расхода μ	—			
8. Размеры струи в сжатом сечении d_1 и d_2	см			
9. Площадь в сжатом сечении ω_c	см ²			
10. Коэффициент сжатия ε	—			
11. Коэффициент скорости φ	—			
12. Коэффициент сопротивления ζ	—			
13. Дальность отлета струи L_x	см			

Обработка результатов.

1. Вычисляются площади отверстий в тонкой стенке и исследуемых насадках.

2. По формуле (11.3) определяется коэффициент расхода.

3. Определяется площадь сжатого сечения струи:

$$\omega_c = \frac{\pi}{4} d_1 d_2 . \quad (11.7)$$

4. По формуле (11.5) находится коэффициент сжатия струи.

5. Определяется коэффициент скорости:

$$\varphi = \mu / \varepsilon . \quad (11.8)$$

6. Определяется сумма коэффициентов сопротивлений:

$$\Sigma \zeta = 1 / \varphi^2 - \alpha_c . \quad (11.9)$$

7. Полученные опытные коэффициенты сопоставляются с приведенными в литературе (табл. 3 приложения).

Контрольные вопросы

1. Какой физический смысл имеют коэффициенты расхода, сжатия, скорости и какая взаимосвязь между ними?
2. При каких условиях истечение из цилиндрического насадка становится таким же, как из отверстия в тонкой стенке?

Лабораторная работа 12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ИСТЕЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПОРЕ И ПОСТОЯННОМ ПРИТОКЕ

Истечение жидкости через отверстия и насадки при переменном напоре относится к области неустановившегося движения, когда характеристики потока – скорость истечения и напор – изменяются во времени.

Время понижения (повышения) уровня жидкости в резервуаре (рис. 12.1) с постоянной площадью его сечения при постоянном притоке определяется по формуле

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} \left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} + \sqrt{H_a} \ln \frac{\sqrt{H_a} - \sqrt{H_1}}{\sqrt{H_a} - \sqrt{H_2}} \right), \quad (12.1)$$

где Ω – площадь сечения резервуара;

μ – коэффициент расхода отверстия;

H_1 – начальный напор;

H_2 – конечный напор;

H_a – напор, соответствующий установившемуся движению, при котором расход из отверстия равен притоку:

$$H_a = \frac{Q_a^2}{\mu^2 \omega^2 2g}, \quad (12.2)$$

где Q_a^2 – расход, поступающий в резервуар.

Зная начальный напор H_1 и значение H_a , можно судить об изменении уровня жидкости в резервуаре. Возможны следующие условия:

$H_1 > H_a$ – уровень жидкости в резервуаре понижается;

$H_1 < H_a$ – уровень жидкости в резервуаре повышается;

$H_1 = H_a$ – уровень жидкости в резервуаре не изменяется.

Задачи исследования:

- 1) определить опытным путем время изменения напора от H_1 до H_2 ;
- 2) вычислить для условий опытов время изменения напора;
- 3) сопоставить время понижения уровней в опыте с расчетным.

Лабораторная установка. Установка состоит из резервуара I (рис. 12.1), фланца 2 для присоединения диска с отверстием 3 , клапана 4 с системой рычагов 5 для перекрытия отверстия 3 . Заполнение резервуара I водой производится через задвижку 7 , установленную на трубопроводе 8 . Опорожнение резервуара I производится через задвижку 9 . Напор в резервуаре измеряется пьезометром 6 .

Проведение опытов.

В лабораторной работе проводятся четыре опыта, различающихся между собой значением поступающего в резервуар расхода Q_a , начальным напором H_1 и конечным H_2 .

Рекомендуется следующий порядок проведения опытов:

- 1) измеряются размеры сечения резервуара ℓ , b и диаметр отверстия d ;
- 2) резервуар I заполняется водой и задвижкой 7 устанавливается расход Q_a ;
- 3) открывается клапан 4 . Выжидается некоторое время стабилизации уровня воды в резервуаре I , который соответствует напору H_a , и его величина снимается по пьезометру 6 ;
- 4) открывается задвижка 9 и производится понижение уровня воды в резервуаре I (примерно на половину от величины H_a), после чего задвижка 9 закрывается;
- 5) выжидается некоторое время стабилизации уровня воды в резервуаре I . Одновременно по пьезометру 6 фиксируется напор H_1 и включается секундомер;
- 6) после повышения напора до значения H_2 секундомер останавливается (напоры H_1 и H_2 назначаются произвольно). Затем опыт повторяется. Количество опытов устанавливается преподавателем.

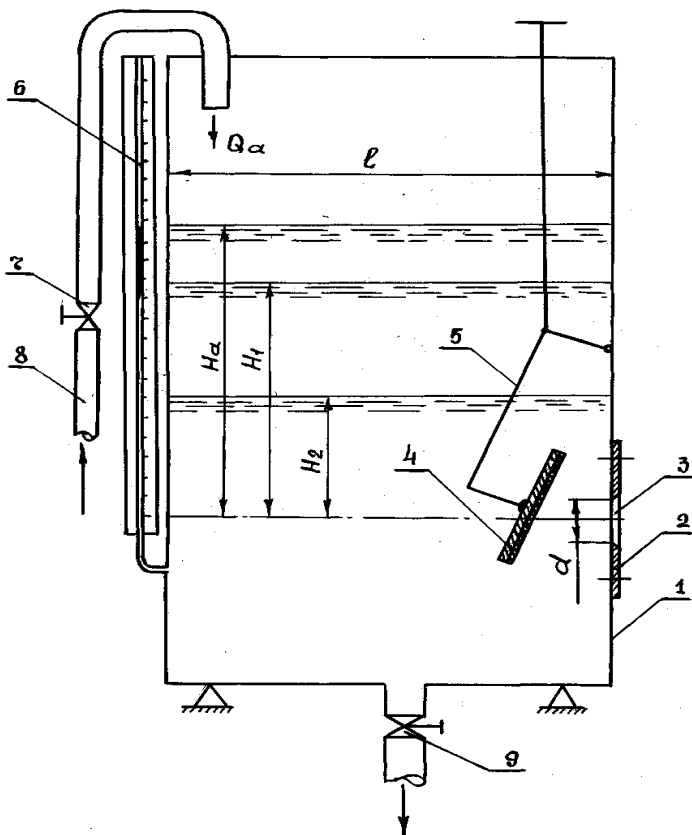


Рис. 12.1. Схема опытной установки

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 12.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 12.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов			
		1	2	3	4
1	2	3	4	5	6
1. Размер резервуара в плане $\ell \times b$	см				
2. Площадь сечения резервуара Ω	см ²				
3. Диаметр отверстия d	мм				

1	2	3	4	5	6
4. Площадь сечения отверстия ω	см ²				
5. Коэффициент расхода μ	–				
6. Постоянный напор H_a	см				
7. Начальный напор H_1	см				
8. Конечный напор H_2	см				
9. Время опорожнения резервуара: опытное $t_{оп}$	с				
вычисленное t_p	с				
10. Разница Δt	%				

Обработка результатов.

1. Определяется площадь сечения резервуара и отверстия.
2. Время измерения напора от H_1 до H_2 вычисляется по формуле (10.1).

Коэффициент расхода μ для отверстия принимается из работы 11. Если эта работа не выполнялась, то коэффициент расхода принимается из справочной литературы.

3. Находится относительная разность в процентах между опытным $t_{оп}$ и вычисленным t_p временем истечения.

Контрольные вопросы

1. От каких параметров зависит время понижения (повышения) напора от H_1 до H_2 при притоке Q_a ?
2. Как устанавливается повышение или понижение уровня жидкости в резервуаре при истечении из отверстия с притоком?

Лабораторная работа 13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПОРЕ БЕЗ ПРИТОКА

Время изменения напора от H_1 до H_2 при истечении жидкости в атмосферу и постоянной площади резервуара, когда отсутствует приток, является частным случаем истечения с притоком.

Так как $Q_a = 0$, то $H_a = 0$ и формула (12.1) примет вид

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} \left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} \right). \quad (13.1)$$

Задачи исследования:

- 1) определить опытным путем время изменения напора от H_1 до H_2 ;
- 2) вычислить для условий опытов время изменения напора;
- 3) сопоставить время понижения уровней в опыте с расчетным.

Лабораторная установка.

Схема опытной установки показана на рис. 12.1, а ее описание дано в лабораторной работе 12.

Проведение опытов.

В лабораторной работе выполняются три опыта, различающихся между собой начальными H_1 и конечными H_2 напорами.

Рекомендуется следующий порядок проведения опытов:

- 1) замеряются размеры сечения резервуара ℓ , b и диаметр отверстия d ;
- 2) по пьезометру b определяется первоначальный напор H_1 ;
- 3) открывается клапан 4 и одновременно включается секундомер;
- 4) после падения напора до значения H_2 секундомер останавливается. Напоры H_1 до H_2 назначаются произвольно.

Результаты измерений и вычислений записываются в табл. 13.1 журнала лабораторных работ.

Обработка результатов.

1. Определяются площади сечения резервуара и отверстия.
2. Время изменения напора от H_1 до H_2 вычисляется по формуле (13.1).

Коэффициент расхода μ для отверстия принимается из работы 11. Если эта работа не выполнялась, то коэффициент расхода принимается из справочной литературы.

3. Находится относительная разность между опытным и вычисленным временем истечения.

Т а б л и ц а 13.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1. Размер резервуара $\ell \times b$	см			
2. Площадь сечения резервуара Ω	см ²			
3. Диаметр отверстия d	мм			
4. Площадь сечения отверстия ω	см ²			
5. Коэффициент расхода μ	—			
6. Начальный напор H_1	см			
7. Конечный напор H_2	см			
8. Время истечения: опытное $t_{оп}$	с			
вычисленное t_r	с			
9. Относительная разность Δt	%			

Контрольные вопросы

1. Как определяется время изменения напора от H_1 до H_2 , если $H_a = 0$?
2. От каких факторов зависит время изменения напора от H_1 до H_2 ?

Лабораторная работа 14. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДА ИЗ ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ ТРУБ

Трубопроводы, имеющие общие узловые точки в их начале и конце, называют параллельно соединенными (рис. 14.1). Такие трубопроводы обеспечивают повышенную надежность водоснабжения, так как в случае выхода из строя одного участка вода будет поступать по другим.

Поскольку параллельные трубопроводы разветвляются в общей точке A (рис. 14.1) с единым напором H_A и соединяются в другой общей точке B с единым напором H_B , то потери напора $h_{тр}$ в каждом из двух трубопроводов будут одинаковыми, т. е.

$$H_A - H_B = h_{тр1} = h_{тр2} = \ell_1 \frac{Q_1^2}{K_1^2} = \ell_2 \frac{Q_2^2}{K_2^2}, \quad (14.1)$$

где ℓ_1, ℓ_2 – длины соответственно первого и второго участков;

Q_1, Q_2 – расходы соответственно на первом и втором участках;

K_1, K_2 – расходные характеристики соответственно первого и второго трубопроводов, определяемые в общем виде по формуле $K = C\omega\sqrt{R}$.

Из уравнения (14.1) можно выразить один из расходов:

$$Q_2 = Q_1 \frac{K_2}{K_1} \sqrt{\ell_1 / \ell_2}. \quad (14.2)$$

Сумма расходов в общих трубопроводах равна расходу до их разветвления, т. е.

$$Q_1 + Q_2 = Q. \quad (14.3)$$

Решая систему уравнений (14.2) и (14.3), можно найти расходы на обоих параллельных участках.

Потери напора $h_{тр}$ между узловыми точками A и B определяют как потери напора на одном из участков (безразлично на котором) по формуле

$$h_{тр} = \ell \frac{Q^2}{K^2}. \quad (14.4)$$

Задачи исследования:

- 1) определить потери напора между узловыми точками параллельно соединенными трубами опытным путем $h_{тр}^{оп}$;
- 2) сравнить полученные величины с вычисленными по формуле (14.4).

Лабораторная установка. Установка (рис. 14.1) состоит из двух параллельно соединенных трубопроводов 1 и 2 , напорного резервуара 3 с постоянно поддерживаемым уровнем и задвижки 6 . В узловых точках A и B установлены пьезометры 4 и 5 .

Проведение опытов. В работе выполняются три опыта, различающихся между собой расходами, которые определяются весовым способом. Величина расхода регулируется задвижкой 6 . После стабилизации уровней в пьезометрах 4 и 5 снимаются их показания H_A и H_B .

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 14.1 журнала лабораторных работ.

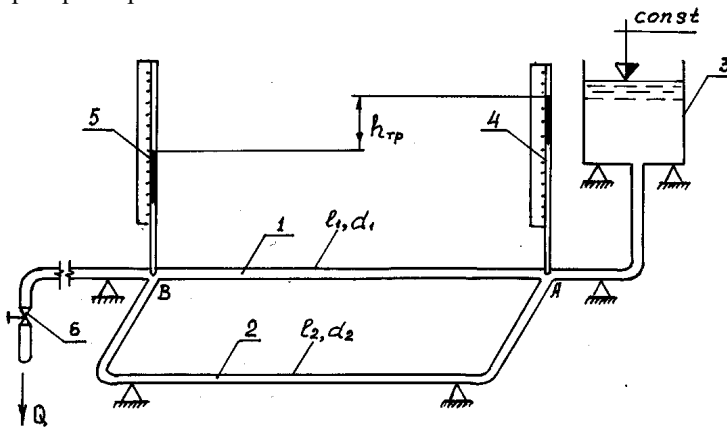


Рис. 14.1. Схема водопроводной сети с параллельным соединением труб

Т а б л и ц а 14.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1. Диаметр труб: первой ветви d_1 второй ветви d_2	см см			
2. Длина труб: первой ветви l_1 второй ветви l_2	см см			
3. Пьезометрический напор в узловых точках: A_{HA} B_{HB}	см см			
4. Расходная характеристика: первой ветви K_1 второй ветви K_2	см ³ /с см ³ /с			
5. Объем воды в мерном баке W	см ³			
6. Время наполнения мерного бака t	с			
7. Расход воды в трубах первой и второй ветвей Q	см ³ /с			
8. Расход воды в трубе первой (второй) ветви Q_1 (Q_2)	см ³ /с			
9. Потеря напора между узловыми точками: опытная $h_{тр}$ вычисленная $h_{тр}$	см см			
10. Относительная разность Δh	%			

Обработка результатов.

1. Вычисляются площади сечений ω_1 и ω_2 , гидравлические радиусы R_1 и R_2 , коэффициенты Шези C_1 и C_2 , расходные характеристики K_1 и K_2 труб первой и второй ветвей.

2. Определяется суммарный расход Q воды в трубах первой и второй ветвей $Q_1 + Q_2$.

3. Определяется расход воды в трубе первой Q_1 или второй Q_2 ветви путем решения системы уравнений (14.2) и (14.3).

4. Устанавливаются потери напора между узловыми точками по опытным данным $h_{тр}^{оп} = H_A - H_B$ и по формуле (14.4).

5. Сопоставляются опытные $h_{тр}^{оп}$ и вычисленные по формуле (14.4) значения потерь напора.

Контрольные вопросы

1. Какие признаки работы характерны для трубопровода из параллельно соединенных труб?

2. Как определить расходы в параллельных ветвях трубопровода?

Лабораторная работа 15. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДА С РАВНОМЕРНЫМ ПУТЕВЫМ РАСХОДОМ

Существуют конструкции трубопроводов различного назначения, в которых часть жидкости непрерывно отбирается по пути. Расход жидкости в таком трубопроводе переменный: он постепенно уменьшается по длине ℓ от начала к концу. В трубопроводе с равномерным путевым расходом $q = \Delta Q / \Delta \ell \approx \text{const}$. К таким трубопроводам можно отнести трубопроводы распылителей жидких ядохимикатов и удобрений, дождевальных аппаратов и т. п. Распределительный трубопровод, из которого вода отбирается по пути в одинаковые близкорасположенные здания или водоразборные колонки, также можно считать с некоторым приближением трубопроводом с равномерным путевым расходом (при одновременном включении всех потребителей).

В случаях, когда в трубопроводе кроме путевого расхода Q_p существует транзитный расход Q_t , потери напора $h_{тр}$ между узловыми точками A и B (рис. 15.1) определяются до формуле

$$h_{тр} = \ell \cdot Q_p^2 / K^2, \quad (15.1)$$

где Q_p^2 – расчетный расход на участке AB , определяемый по зависимости

$$Q_p = Q_t + 0,55 \cdot Q_p. \quad (15.2)$$

Задачи исследования:

- 1) определить потери напора между узловыми точками трубопровода с путевым и транзитным расходами опытным путем;
- 2) сравнить полученные величины с вычисленными по формуле (15.1).

Лабораторная установка. Установка (рис. 15.1) состоит из двух стальных труб, устроенных по типу труба 1 в трубе 2, напорного резервуара 3 с постоянно поддерживаемым уровнем и двумя задвижками 6 и 7. При этом трубопровод 1 имеет вдоль своей длины отверстия с расстоянием между ними на отдельных, по мере продвижения воды, участках 20, 18, 16 и 14 см. Это позволяет моделировать трубопровод с более или менее равномерным путевым расходом. В узловых точках A и B установлены пьезометры 4 и 5.

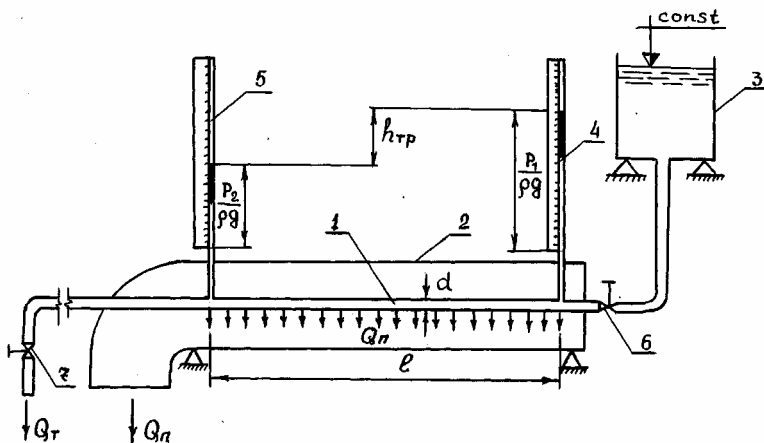


Рис. 15.1. Схема трубопровода с равномерным путевым расходом

Проведение опытов. В работе выполняются три опыта, различающихся между собой транзитным Q_T и путевым $Q_{п}$ расходами, которые определяются весовым способом. Величина расходов регулируется задвижками 6 и 7. После стабилизации уровней в пьезометрах 4 и 5 снимаются их показания H_A и H_B .

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 15.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 15.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1	2	3	4	5
1. Диаметр трубопровода d	см			
2. Длина трубопровода l	см			
3. Пьезометрический напор в узловых точках: $A H_A$ $B H_B$	см см			
4. Объем воды в мерном баке: транзитного расхода W_T путевого расхода $W_{п}$	см ³ см ³			
5. Время наполнения мерного бака: при транзитном расходе t_T при путевом расходе $t_{п}$	с с			

Окончание табл. 15.1

1	2	3	4	5
6. Величина расхода: транзитного Q_t путевого Q_n	см ³ /с см ³ /с			
7. Расходная характеристика трубопровода K	см ³ /с			
8. Потеря напора между узловыми точками A и B : опытная $h_{тр}$ вычисленная $h_{тр}$	см см			
9. Относительная разность Δh	%			

Обработка результатов.

1. Вычисляются площадь сечения ω , гидравлический радиус R , коэффициент Шези C , находится расходная характеристика K трубы.

2. Определяются весовым способом транзитный Q_t и путевой Q_n расходы.

3. Вычисляется расчетный расход Q_p по зависимости (15.2).

4. Устанавливаются потери напора между узловыми точками по опытными данным

$$h_{тр}^{оп} = H_A - H_B$$

и по формуле (15.1).

5. Сопоставляются опытные и вычисленные по формуле (15.1) значения потерь на участке AB трубопровода.

Контрольные вопросы

1. Какие расходы проходят в начальном A и конечном B сечениях трубопровода?

2. Как изменяются показания пьезометров в точках A и B при увеличении открытия задвижки 7 ?

Лабораторная работа 16. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЬЦЕВОЙ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ

Кольцевая водопроводная сеть представляет собой замкнутую систему трубопроводов (рис. 16.1). В ней, в отличие от тупиковой сети, вода к любой узловой точке может подводиться с двух и более направлений. Поэтому такие сети более надежны, чем тупиковые, так как в случае неисправности одного из участков подача воды в узловые точки обеспечивается по другим смежным участкам (хотя и в несколько меньшем количестве и при меньшем свободном напоре).

Расчет кольцевой водопроводной сети представляет собой сложную задачу, так как для принятой схемы трубопровода и заданных узловых расходов Q_A , Q_C неизвестны величины и направления линейных расходов Q_1 , Q_2 , Q_3 . Для определения последних составляется соответствующее число уравнений исходя из следующих условий:

а) для каждого узла (1, 2, 3) сумма приходящих к нему расходов (знак «+») равна сумме уходящих от него расходов (знак «-»), включая узловой, т. е. $\sum Q = 0$;

б) для каждого кольца сумма потерь напора в линиях с движением воды по часовой стрелке (знак «+») равна сумме потерь напора в линиях с движением воды против часовой стрелки (знак «-»), т. е. $\sum h_{тр} = 0$.

Потери напора на отдельных участках $h_{тр}$ определяются по формуле

$$h_{тр} = \ell \frac{Q^2}{K^2}. \quad (16.1)$$

При известных потерях напора на участке величину линейного расхода Q можно определить по формуле

$$Q = K \sqrt{\frac{h_{тр}}{\ell}}. \quad (16.2)$$

Задачи исследования:

1) определить расходы в узловых точках A и C опытным путем ($Q_{оп}$);

2) сравнить их величины с вычисленными по формуле ($Q_{т}$).

Лабораторная установка. Установка (рис. 16.1) состоит из трех замкнутых стальных трубопроводов 1, 2 и 3, напорного резервуара 4 с постоянно поддерживаемым уровнем и задвижек 5 и 6. В узловых точках A , B , C установлены пьезометры 7, 8 и 9.

Проведение опытов. В работе выполняются три опыта, различающихся между собой узловыми расходами Q_A и Q_C , которые определяются весовым способом. Величина расходов регулируется задвижками 5 и 6. После стабилизации уровней в пьезометрах 7, 8 и 9 снимаются их показания H_A , H_B , H_C .

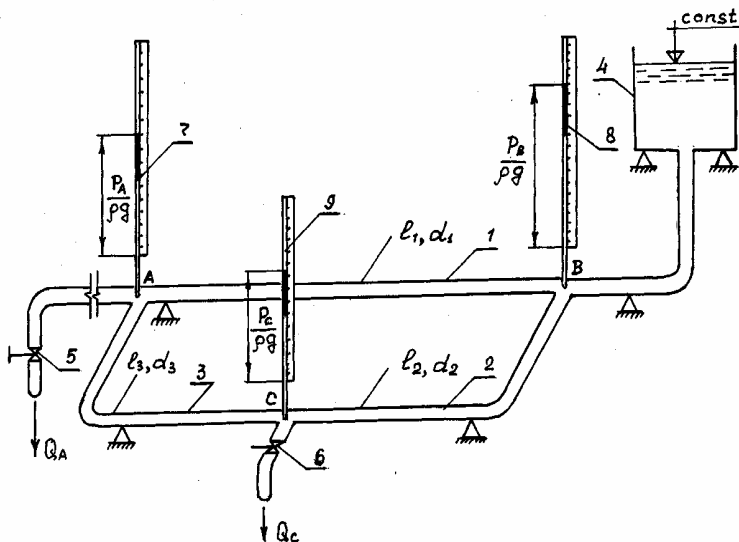


Рис. 16.1. Схема кольцевой водопроводной сети

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 16.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 16.1. Результаты измерений, вычислений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1	2	3	4	5
1. Диаметр трубы на участках:				
AB d_1	см			
BC d_2	см			
AC d_3	см			
2. Длина трубы на участках:				
AB l_1	см			
BC l_2	см			
AC l_3	см			
3. Пьезометрический напор в узловых точках:				
A H_a	см			
B H_b	см			
C H_c	см			

1	2	3	4	5
4. Расходная характеристика трубы на участках: AB K_1 BC K_2 AC K_3	$\text{см}^3/\text{с}$ $\text{см}^3/\text{с}$ $\text{см}^3/\text{с}$			
5. Объем воды в мерном баке в узловых точках: A W_a C W_c	см^3 см^3			
6. Время наполнения мерного бака в узловых точках: A t_a C t_c	с с			
7. Потери напора на участках: AB $h_{\text{тр}1}$ BC $h_{\text{тр}2}$ AC $h_{\text{тр}3}$	см см см			
8. Величина линейного расхода на участках: AB Q_1 BC Q_2 AC Q_3	$\text{л}/\text{с}$ $\text{л}/\text{с}$ $\text{л}/\text{с}$			
9. Величина сосредоточенного расхода в узловой точке A : опытная $\sum Q_{\text{оп}}$ вычисленная $\sum Q_{\text{т}}$	$\text{л}/\text{с}$ $\text{л}/\text{с}$			
То же в узловой точке C : опытная $\sum Q_{\text{оп}}$ вычисленная $\sum Q_{\text{т}}$	$\text{л}/\text{с}$ $\text{л}/\text{с}$			
11. Относительная разность расходов в узловых точках: A $\sum Q_A$ C $\sum Q_C$	$\%$ $\%$			

Обработка результатов.

1. Вычисляются площади сечений $\omega_1, \omega_2, \omega_3$; гидравлические радиусы R_1, R_2 и R_3 ; коэффициенты Шези C_1, C_2, C_3 ; расходные характеристики K_1, K_2 и K_3 труб соответственно на участках AB, BC и AC .

2. Устанавливается опытная величина расходов в узловых точках A и C ($Q_{\text{оп}}$).

3. Вычисляются потери напора $h_{\text{тр}}$ на участках AB, BC и AC по следующим формулам:

$$H_{AB} = h_{\text{тр}1} = H_A - H_B; \quad H_{BC} = h_{\text{тр}2} = H_B - H_C;$$

$$H_{AC} = h_{\text{тр}3} = H_A - H_C. \quad (16.3)$$

4. Определяется величина и направление линейных расходов на участках AB , BC и AC с использованием формулы (16.2).

5. С использованием величин и направлений линейных расходов устанавливаются узловые расходы в точках A и C (Q_T).

6. Сопоставляются опытные $Q_{оп}$ и вычисленные Q_T значения расходов в узловых точках A и C (определяется величина ΔQ).

Контрольные вопросы

1. Как вычисляются расходы и потери напора на участках кольцевой водопроводной сети?

2. Как изменятся показания пьезометров в точках A , B и C при уменьшении открытия задвижки 5?

Лабораторная работа 17. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В ТРУБОПРОВОДЕ

Гидравлический удар – явление, возникающее в движущейся жидкости при быстром изменении скорости в одном из сечений потока. Он характеризуется возникновением волны давления, которая распространяется от места изменения скорости и вызывает в трубопроводе колебания давления и деформации стенок, которые могут быть значительными. Например, если при движении воды в длинном стальном трубопроводе мгновенно закрыть затвор на конце его, то повышение давления приблизительно равно 1,0–1,2 МПа на каждый 1 м/с первоначальной скорости потока. Вследствие этого в нормальной работе трубопровода могут возникать осложнения вплоть до разрыва стенок, возможны повреждения оборудования насосной станции.

При гидравлическом ударе может быть также и резкое понижение давления вплоть до давления насыщенных паров и разрыва сплошности потока жидкости. Основные причины возникновения гидравлического удара:

1) быстрое закрытие или открытие запорных и регулирующих устройств;

2) внезапная остановка насоса;

3) пуск насоса при открытом затворе на нагнетательной линии. После резкого закрытия затвора вдоль трубопровода в потоке распространяется ударная волна с некоторой скоростью C_0 . Время, необходимое для прохождения ударной волной двойной длины трубопровода (к началу и обратно), называется фазой гидравлического удара:

$$t_{\phi} = 2 \cdot \ell / C_0. \quad (17.1)$$

Если время закрытия затвора меньше фазы гидравлического удара, то последний называется прямым. Максимальное повышение давления в этом случае определяется по формуле Н. Е. Жуковского

$$\Delta p = \rho V_0 C_0, \quad (17.2)$$

где V_0 – скорость движения жидкости до закрытия затвора.

Скорость распространения волны гидравлического удара можно определить по формуле Н. Е. Жуковского

$$C_0 = \sqrt{\frac{E_{\text{ж}}}{\rho}} / \sqrt{1 + \frac{E_{\text{ж}} d}{E \delta}}, \quad (17.3)$$

где $E_{\text{ж}}$ – модуль объемной упругости жидкости;

E – модуль упругости материала стенок трубопровода;

d, δ – соответственно диаметр и толщина стенки трубы.

Из формулы (17.3) следует, что в случае абсолютно жесткого трубопровода скорость распространения ударной волны $C_0 = C_{\text{зв}} = \sqrt{E_{\text{ж}} / \rho}$. Она равна скорости звука в жидкости, занимающей неограниченно большой объем. Так, для воды при температуре 10 °С $E_{\text{ж}} = 2,03 \cdot 10^9$ Па, поэтому $C_{\text{зв}} = 1430$ м/с.

Если время закрытия затвора больше фазы гидравлического удара, то такой удар называется непрямым. При этом максимальное повышение давления в трубопроводе будет меньше, чем в случае прямого гидравлического удара, и определяется по формуле (при допущении, что оно зависит линейно от скорости V_0)

$$\Delta p = 2\rho V_0 \ell / t_3, \quad (17.4)$$

где t_3 – время закрытия затвора.

Задачи исследования:

1) задавая различные средние скорости движения жидкости в трубопроводе, определить опытным путем величины повышения давления при гидравлическом ударе;

2) вычислить по формулам Н. Е. Жуковского величины повышения давления для условий опытов;

3) сравнить полученные опытные величины Δp с расчетными.

Лабораторная установка. Лабораторная установка (рис. 17.1) состоит из напорного резервуара 1, стального трубопровода 2, затвора 4 и индикатора давления 3.

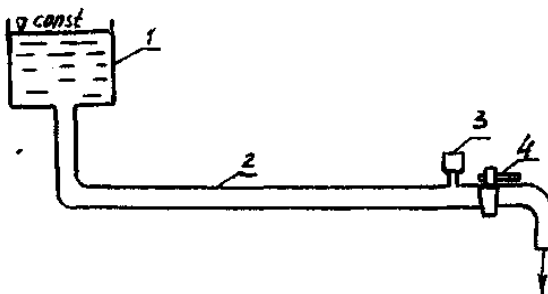


Рис. 17.1. Схема опытной установки

Проведение опытов.

1. Измеряется длина, диаметр опытного трубопровода, толщина его стенки.
2. Затвором 4 устанавливается постоянный небольшой расход, который определяется весовым способом.
3. Мгновенно закрывается затвор 4.
4. По индикаторной диаграмме определяется повышение давления.
5. Повторяется вышеописанный опыт еще при двух больших значениях расхода в трубопроводе.

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 17.1 журнала лабораторных работ.

Таблица 17.1. Результаты измерений и обработки опытных данных

Наименование	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
1. Длина трубы ℓ	см			
2. Диаметр трубы d	см			
3. Толщина стенок трубы δ	см			
4. Материал трубы	—			
5. Площадь сечения трубы ω	см ²			
6. Объем воды в мерном баке W	см ³			
7. Время наполнения мерного бака t	с			
8. Расход Q	см ³ /с			
9. Скорость течения воды в трубе до закрытия крана V_0	см/с			
10. Скорость C_0 по формуле Жуковского	см/с			
11. Длительность фазы $t_{\text{ф}}$	с			
12. Повышение давления: по формуле Жуковского $\Delta p_{\text{т}}$ опытное $\Delta p_{\text{оп}}$	кПа кПа			
13. Относительная разность	%			

Обработка результатов.

1. Определяется площадь сечения трубы, расход и средняя скорость движения жидкости до закрытия затвора.
2. Вычисляются по формулам (17.3) и (17.2) соответственно скорость распространения ударной волны и повышение давления при гидравлическом ударе. Для стальной трубы принимается $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па.
3. Полученные опытные значения повышения давления сравниваются с расчетными.

Контрольные вопросы

1. В каких случаях возникает в трубопроводе гидравлический удар?
2. Как определяется фаза гидравлического удара?
3. От чего зависит повышение давления при гидравлическом ударе и скорость распространения волны?
4. Как защитить трубопровод от опасного повышения давления при гидроударе?