ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ
Декан ТЭФ
доц., к.т.н.
_____С.А.Беляев
«____»_____2006г.

Лабораторный практикум
по механике жидкости и газа

Методические указания к выполнению лабораторных работ по гидравлике по курсам «Гидравлика», «Механика жидкости и газа» и «Гидрогазодинамика» для студентов ТЭФ, ИГНД, ИЭФ

Томск 2006

УДК 536.24

Лабораторный практикум по механике жидкости и газа.

Методические указания к выполнению лабораторных работ по гидравлике по курсам «Гидравлика», «Механика жидкости и газа» и «Гидрогазодинамика» для студентов ТЭФ, ИГНД, ИЭФ. - Томск: Изд-во ТПУ, 2006.- 56 с.

Составители: **к.т.н., доцент** **В.И.Максимов**
ассист. **В.Е.Юхнов**
Рецензент **доц., д.ф.-м.н.** **В.С.Логинов**

Методические указания рассмотрены на методическом семинаре кафедры теплофизики и гидромеханики ТЭФ «8»сентября 2005г.

Зав.кафедрой ТГМ
доц.,д.ф.-м.н. **В.С.Логинов**

ВВЕДЕНИЕ

Целью проведения лабораторных работ по гидромеханике является усвоение и закрепление теоретических знаний, выявление физической сущности гидромеханических явлений и опытное подтверждение их закономерностей, проверка значений эмпирических коэффициентов в теоретических зависимостях, а также приобретение навыков по самостоятельному проведению и обработке результатов гидромеханических исследований.

Данный практикум включает описание семи лабораторных работ по курсам «Механика жидкости и газа», «Гидрогазодинамика» и «Гидравлика».

РАБОТА 1. ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ

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

1.1. Общие сведения

Жидкостью называют рабочее тело,обладающее большой текучестью, не имеющее собственной формы и принимающее форму сосуда, в котором находится. Основные физические характеристики жидкости - плотность, сжимаемость, тепловое расширение, вязкость и поверхностное натяжение.

Плотность определяется отношением массы m жидкости к ее объему:

$$\rho = \frac{m}{W}.$$

Сжимаемость - свойство жидкости уменьшать объем под действием давления. Она оценивается коэффициентом сжимаемости β_p, показывающим относительное уменьшение объема жидкости W при повышении давления P на единицу:

$$\beta_P = \frac{1}{W}\left(\frac{\Delta W}{\Delta P}\right).$$

Тепловое расширение - свойство жидкости изменять объем при нагревании - характеризуется коэффициентом теплового расширения β_t,, численно равным относительному приращению объема W с повышением температуры T на один градус при постоянном давлении:

$$\beta_T = \frac{1}{W}\left(\frac{\Delta W}{\Delta T}\right). \qquad (1.1)$$

Как правило, при нагревании объем жидкости увеличивается.

Вязкость - свойство жидкости сопротивляться относительному скольжению ее слоев. Она оценивается динамическим коэффициентом вязкости μ, который измеряется в паскаль-секундах (Па·с) и численно равен касательному напряжению между соседними слоями, если их относительная скорость перемещения численно совпадает с толщиной слоя. В гидравлических расчетах также используют кинематический коэффициент вязкости ν, определяемый из формулы $\nu = \mu / \rho$ и измеряемый квадратными метрами на секунду ($м^2/с$) и стоксами ($1Ст=1см^2/с$).

Коэффициенты вязкости капельных жидкостей практически не зависят от давления. Они определяются видом жидкости и температурой. С повышением температуры вязкость жидкостей существенно уменьшается. Кинематический коэффициент вязкости воды в $см^2/с$ при температуре T (°C) может быть вычислен по формуле:

$$\nu=17{,}9/(1000 + 34T + 0{,}22\ T^2). \qquad (1.2)$$

Значения плотности ρ, коэффициентов сжимаемости β_p, теплового расширения β_t, вязкости ν и поверхностного натяжения σ для некоторых жидкостей при температуре 20° С.

Таблица 1.1

Жидкость	ρ кг/м^3	$\beta_p * 10^3$ МПа$^{-1}$	$\beta_t * 10^3$ ° С$^{-1}$	$\nu * 10^6$ м^2/с	$\sigma * 10^3$ Н/м
Вода пресная	998	0.49	0.15	1.01	73
Спирт этиловый	790	0.78	1.10	1.52	23
Глицерин	1260	0.22	0.50	1180.00	65
Бензин	680-780	0.77	1.26	0.65	22
Ртуть	13546	0.04	0.18	0.11	490
Масло: Индустриальное 20	900	0.72	0.73	110	25
Индустриальное 50	910	0.68	0.70	340	25
Трансформаторное	890	0.60	0.70	30	25
Турбинное	900	0.58	0.70	100	25
Веретенное АУ	890	0.60	0.70	49	25
АМГ-10	850	0.76	0.83	20	25

Поверхностное натяжение - свойство жидкости образовывать поверхностный слой взаимно притягивающихся молекул. Поверхностное натяжение стремится сократить свободную поверхность жидкости и характеризуется коэффициентом поверхностного натяжения σ, численно равным силе на единице длины контура свободной поверхности.

Поверхностное натяжение определяется видом жидкости, газа над ее свободной поверхностью, примесями и температурой.

Основные физические параметры жидкостей при температуре 20°С и атмосферном давлении приведены в табл.1.1.

1.2. Описание устройства 1

В устройстве 1 приборы для измерения физических параметров жидкостей встроены в общем прозрачном корпусе (рис.1.1.), на котором указаны параметры приборов, необходимые для обработки опытных данных.

Термометр 1 показывает температуру всех жидкостей, залитых в приборы и устройства комплекта, а также служит для изучения теплового расширения находящейся в ней жидкости. Термометр имеет стеклянный баллон с капилляром, заполненным термометрической жидкостью, и шкалу. Принцип его действия основан на тепловом расширении жидкостей. Варьирование температуры окружающей среды приводит к соответствующему изменению объема термометрической жидкости и, следовательно, ее уровня в капилляре. Уровень указывает на шкале значение температуры.

Ареометр 2 служит в настоящей работе для измерения плотности (концентрации) водного раствора глицерина или спирта поплавковым методом и представляет собой пустотелый цилиндр со стержнем в верхней части. Нижняя часть цилиндра заполнена дробью для обеспечения вертикального положения ареометра в исследуемой жидкости. Глубина погружения ареометра является функцией плотности (концентрации), считываемой со шкалы на стержне по верхнему краю мениска жидкости вокруг стержня.

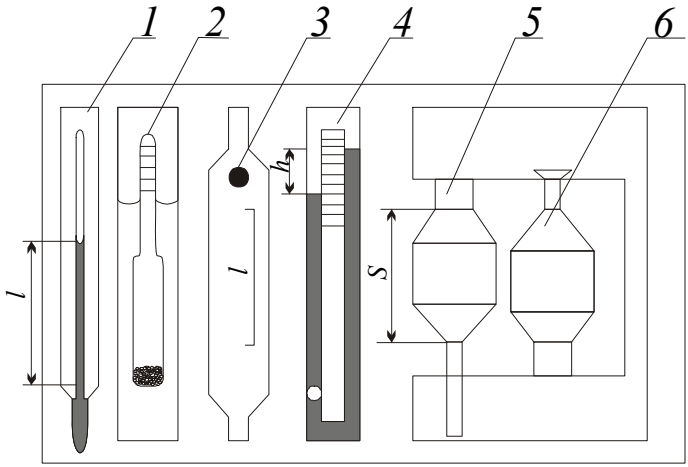


Рис.1.1

Вискозиметр Стокса 3 позволяет определить вязкость жидкости по скорости падения в ней шарика. Прибор содержит цилиндрическую полость с центрирующими каналами на концах и шарик. Центрирующие каналы обеспечивают падение шарика по оси полости. Полость прибора заполнена водно-глицериновым раствором.

Плотномер-вискозиметр 4 конструкции автора содержит два вертикальных канала, сообщающихся между собой сверху и снизу. В один из каналов с малым зазором помещен шарик. Прибор заполнен маслом, вид которого подлежит определению путем измерения его плотности и вязкости по времени падения шарика и перепаду уровней в каналах.

Вискозиметр Оствальда 5 включает небольшую емкость с капилляром. Вязкость определяется по времени истечения жидкости (в настоящей работе воды) из емкости через капилляр.

Сталагмометр 6 служит для определения поверхностного натяжения жидкости методом отрыва капель. Он объединен с визкозиметром 5 общими полостями и содержит емкость с капилляром, расширенным на конце для накопления жидкости в виде капли. Сила поверхностного натяжения в момент отрыва капель равна их весу, который легко вычисляется по плотности жидкости и числу капель, полученному при опорожнении емкости сталагмометра заданного объема.

Приборы 3, 4, 5 и 6 приводятся в действие путем поворота корпуса устройства в его плоскости.

1.3. Порядок выполнения работы

1.3.1. Определение коэффициента теплового расширения термометрической жидкости

1. Подсчитать общее число градусных делений ΔT в шкале термометра 1 и измерить расстояние l между крайними штрихами шкалы.

2. Вычислить приращение объема ΔW термометрической жидкости, соответствующее повышению ее уровня в капилляре от нижнего до верхнего штриха шкалы

$$\Delta W = \pi \cdot r^2 \cdot l$$

где r - радиус капилляра термометра.

3. С учетом начального (при 0°C) объема термометрической жидкости W найти значение коэффициента теплового расширения β_t по формуле (1.1.) и сравнить его со справочным значением β_t (см.табл.1.1.). Значения используемых величин занести в табл.1.2.

Таблица 1.2.

Вид жидкости	r	W	ΔT	l	ΔW	β_t	β_t
	см	**см^3**	**$^{\circ}$C**	**см**	**см^3**	**$^{\circ}$C^{-1}**	**$^{\circ}$C^{-1}**

Примечание. Вид термометрической жидкости, r и W, указаны на корпусе устройства. Эффект расширения баллона и капилляра ввиду малости не учитывается.

1.3.2. Определение плотности и концентрации раствора

1. Измерить плотность водно-глицеринового раствора ρ находящимся в нем ареометром 2.

2. По плотности раствора ρ, воды $\rho_в$ = 998 кг/м^3 и глицерина $\rho_г$ = 1260 кг/м^3 вычислить объемную концентрацию водного раствора глицерина

$$C = 100(\rho - \rho_в) / (\rho_г - \rho_в).$$

Примечание. Если в устройстве 1 вместо ареометра используется спиртометр и соответственно водно-спиртовый раствор, то сначала спиртометром определяется объемная концентрация (крепость) раствора, а затем из табл.1.3. - его плотность.

Таблица 1.3.

C	%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

ρ	кг/м^3	998	985	974	962	948	930	909	885	859	829	789

1.3.3. Определение вязкости водно-глицеринового раствора

1. Повернуть корпус устройства 1 в его плоскости на 180°С и измерить секундомером время t прохождения шариком заданного расстояния l между двумя метками в приборе 3. Опыт выполнить три раза, а затем определить среднеарифметическое значение времени.

2. Вычислить опытное значение динамического коэффициента вязкости раствора

$$\mu = gd^2t(\rho_ш - \rho)/[18\ell + 43{,}2\ell(d/D)]$$

где g - ускорение свободного падения, g = 9,81 м/с^2;

d, D - диаметры шарика и цилиндрической емкости вискозиметра;

ρ, $\rho_ш$ - плотность раствора и вещества шарика;

ℓ - расстояние между двумя метками в приборе 3.

3. Сравнить опытное значение коэффициента вязкости μ с табличным значением μ (табл.1.4).

Таблица 1.4.

Значение динамического коэффициента вязкости водно-глицеринового раствора при 20°С

С, %	8	21	44	76	94	100
$\mu \cdot 10^3$ Па·с	**1.3**	**2.1**	**6.0**	**61.8**	**543.5**	**1490.0**

1.3.4. Определение вида масла

1. Медленно повернуть корпус устройства на 180°С против часовой стрелки и в приборе 4 зафиксировать перепад уровней масла h и время t прохождения шариком расстояния l между двумя метками.

2. Вычислить значение плотности ρ и кинематического коэффициента вязкости ν по формулам

$$\rho = \rho_{ш} /(1 + Ah), \qquad \nu = Bht$$

где $\rho_{ш}$ - плотность материала шарика;

A,B - постоянные прибора; их значения указаны на корпусе и могут быть определены по результатам опытов с жидкостью, плотность и вязкость которой заранее известны.

3. По найденным значениям плотности, вязкости из табл.1.1. определить вид масла в приборе 4. Результаты измерений и расчетов внести в табл.1.5.

Таблица 1.5.

$\rho_ш$	A	B	h	t	ρ	ν	Вид масла
кг/м^3	**м$^{-1}$**	**м/с^2**	**м**	**с**	**кг/м^3**	**м^2 /с**	

1.3.5. Определение вязкости и поверхностного натяжения воды

1. Повернуть устройство в его плоскости по часовой стрелке на один оборот и определить секундомером время t истечения объема воды высотой s из емкости капиллярного

вискозиметра 5 и температуру T по термометру 1 (см. рис.1.1.). Опыт повторить не менее трех раз и вычислить среднеарифметическое значение времени.

2. Вычислить значение кинематического коэффициента вязкости воды через постоянную прибора M

$$\nu = M \cdot t$$

и сравнить его со значением ν', рассчитанным по формуле (1.2.).

3. Повернуть устройство в его плоскости против часовой стрелки на полоборота и подсчитать число капель, полученных в сталагмометре 6 из объема воды высотой s. Опыт повторить не менее трех раз и вычислить среднее арифметическое значение числа капель n.

4. Найти опытное значение коэффициента поверхностного натяжения воды с учетом постоянной сталагмометра K

$$\sigma = K \cdot \rho / n$$

и сравнить его со значением σ', рассчитанным по формуле (1.3.).

Данные свести в табл.1.6.

Таблица 1.6.

M	t	ν	T	ν'	K	ρ	n	σ	σ'
$м^2/с^2$	с	$м^2/с$	°C	$м^2/с$	$м^3/с^2$	$кг/м^3$		$м^2/с$	$м^2/с$

РАБОТА 2. ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

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

2.1. Общие сведения

Гидростатическим давлением называют нормальное сжимающее напряжение в неподвижной жидкости. В

зависимости от базы и направления отсчета различают абсолютное, манометрическое и вакуумметрическое давления.

Абсолютное (полное) давление P отсчитывается от абсолютного вакуума и определяется в любой точке покоящейся жидкости по основному уравнению гидростатики

$$P = P_0+\gamma H,$$

где P_0 - абсолютное давление на свободной поверхности жидкости;

γ - удельный вес жидкости;

H - глубина погружения точки под свободной поверхностью.

За нуль (начало) отсчета может быть принято и атмосферное давление, которое создается силой тяжести воздуха атмосферы. В этом случае избыток абсолютного давления над атмосферным называют манометрическим (избыточным) давлением

$$P_м=P_0 - P_a,$$

а если атмосферное давление превышает абсолютное в интересующей нас точке, то разница между ними (недостаток до атмосферного) называется вакуумметрическим давлением

$$P_в= P_a- P_0.$$

Атмосферное, манометрическое и вакуумметрическое давления измеряют приборами, называемыми соответственно барометрами, манометрами и вакуумметрами. Разность давлений в двух точках измеряют дифманометрами. По принципу действия и типу рабочего элемента приборы подразделяют на жидкостные, механические и электрические.

Жидкостные приборы исторически стали применяться первыми. Их действие основано на принципе уравновешивания измеряемого давления P силой тяжести столба жидкости высотой h в приборе

$$P = \gamma \cdot h,$$

где γ - удельный вес жидкости в приборе, $Н/м^3$.

Поэтому величина давления может быть выражена высотой столба жидкости h с заданным удельным весом γ (мм

вод.ст., мм рт.ст.), а также в паскалях (Па = Н/м ^{2}), технических (ат) и физических (атм) атмосферах

1 ат = 1 кгс/см^2 = 98,1 кПа = 10 м вод.ст. = 735 мм рт.ст.

1 атм =1.033 кгс/см^2 = 101 кПа = 760 мм рт.ст.

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

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

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

2.2. Описание устройства 2

Устройство 2 выполнено прозрачным и включает резервуар 1, частично заполненный жидкостью, и полость 2, сообщаемую через клапан 3 с атмосферой (рис.2.1,а). Для измерения давления и уровня жидкости в резервуаре 1 служат жидкостные приборы 4, 5 и 6. Они представляют собой прозрачные вертикальные каналы со шкалами, размеченными в единицах длины.

Пьезометр 4 сообщается верхним концом через полость 2 и клапан 3 с атмосферой, а нижним - с резервуаром 1. Им определяется манометрическое давление $P_м = \gamma h_п$ на дне резервуара.

Уровнемер 5 соединен обоими концами с резервуаром и служит для измерения уровня жидкости H в нем.

Мановакуумметр 6 представляет собой U - образный канал, частично заполненный жидкостью. Левым коленом

подключен к резервуару, а правым - к полости 2 и предназначен для определения манометрического $P_м=\gamma h_м$ (рис.2.1,а) или вакуумметрического $P_в=\gamma h_в$ (рис.2.1,в) давлений над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 1. Давление в резервуаре можно изменять путем наклона устройства.

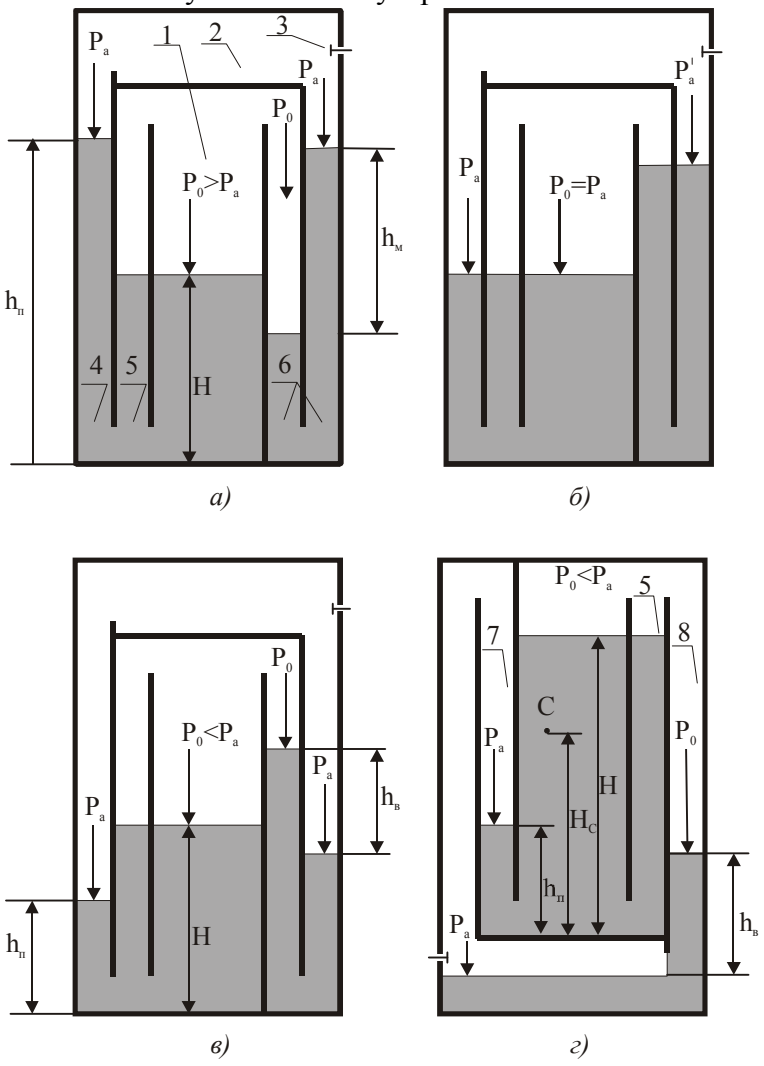


Рис 2.1.

При повороте устройства в его плоскости на 180°С (рис.2.1,г) канал 5 остается уровнемером, колено

мановакуумметра 6 преобразуется в пьезометр 7, а пьезометр 4 - в обратный пьезометр 8, служащий для определения вакуума $P_{во}=\gamma \cdot h_{в}$ над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 1.

2.3. Порядок выполнения работы

1. В резервуаре 1 над жидкостью создать давление выше атмосферного ($P_0>P_a$), о чем свидетельствуют превышение уровня жидкости в пьезометре 4 над уровнем в резервуаре и прямой перепад уровней в мановакуумметре 6 (см. рис.2.1,а). Для этого устройство поставить на правую боковую поверхность, а затем поворотом его против часовой стрелки отлить часть жидкости из левого колена мановакуумметра 6 в резервуар 1.

2. Кратковременно открыть клапан 3 и снять показания пьезометра, уровнемера и мановакуумметра.

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

4. Над жидкостью в резервуаре 1 установить атмосферное давление ($P_0=P_a$), для чего получить совпадение уровней жидкости в мановакуумметре переливом в него части жидкости из резервуара путем наклона устройства вправо (см. рис.2.1,б). Затем выполнить операции по п.п. 2 и 3.

5. Над свободной поверхностью жидкости в резервуаре 1 создать вакуум ($P_0<P_a$), когда уровень жидкости в пьезометре 4 становится ниже, чем в резервуаре, а на мановакуумметре 6 появляется обратный перепад (см. рис.2.1,в). Для этого поставить устройство на левую боковую поверхность, а затем наклоном вправо отлить часть жидкости из резервуара в мановакуумметр. Далее выполнить операции по п.п. 2 и 3.

6. Повернуть устройство в его плоскости по часовой стрелке на 180° (см.рис.2.1,в) и определить манометрическое

или вакуумметрическое давление в заданной преподавателем точке С через показания пьезометра 7, а затем с целью проверки найти его через показания обратного пьезометра 8 и уровнемера 5.

В процессе проведения опытов и обработки экспериментальных данных заполнить таблицу 2.1.

Таблица 2.1.

Наименование величин	**Обозначения, формулы**	**Условия опыта**		
		$P_0>P_a$	$P_0=P_a$	$P_0<P_a$
1.Пьезометри-ческая высота,м	$h_п$			
2.Уровень жидкости в резервуаре, м	H			
3.Манометрическая высота, м	$h_м$			
4.Вакуумметри-ческая высота, м	$h_в$			
5.Манометрическое давление на дне резервуара, кПа	$P_м = \gamma \cdot h_п$			
6.Абсолютное давление на дне резервуара, кПа	$P = P_a + P_м$			
7.Манометрическое давление в резервуаре над жидкостью, кПа	$P_{м0} = \gamma \cdot h_м$			
8.Вакуумметрическое давление в резервуаре над жидкосстью, кПа	$P_{в0} = \gamma \cdot h_в$			
9.Абсолютное давление в резервуаре над жидкостью, кПа	$P_0 = P_a + P_{м0}$ $P_0 = P_a - P_{в0}$			
10.Абсолютное давление на дне резервуара, кПа	$P' = P_0 + \gamma \cdot H$			

11.Относительная погрешность результатов определения давления на дне резервуара,%	$\delta P = \frac{100(P - P')}{P}$			

Примечание. Измерить атмосферное давление барометром или принять P_a = 98.1 кПа, а удельный вес воды γ = 9.81 кН/$м^3$.

РАБОТА 3. ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Цель работы. Наблюдение потоков жидкости с различной структурой и приобретение навыков по установлению режима течения.

3.1. Общие сведения

Различают два основных режима течения жидкости: ламинарный (слоистый) и турбулентный (беспорядочный). При ламинарном режиме частицы жидкости движутся по параллельным траекториям без перемешивания. Турбулентное течение характеризуется пульсацией давления и скоростей частиц, что вызывает интенсивное перемешивание жидкости в потоке. Установление режима является первоочередной задачей при проведении гидравлических расчетов.

Критерием режима течения является число Рейнольдса

$$\mathbf{Re = Vd/\nu,}$$

где V - средняя скорость потока;
d - внутренний диаметр трубы (канала);
ν - кинематический коэффициент вязкости жидкости.

Для потоков некруглого поперечного сечения в выражении (3.1.) вместо геометрического диаметра d используют гидравлический диаметр

$$d_г = 4\omega/\chi,$$

где ω - площадь живого сечения потока;

χ - смоченный периметр.

В инженерной практике режим определяется путем сравнения числа Рейнольдса Re с его критическим значением Re_x , которое соответствует смене режимов и для равномерных потоков жидкости в трубах (каналах) круглого сечения равно 2300, прямоугольного сечения - 2000. Режим считается ламинарным, если $Re<Re_x$ и турбулентным при $Re>Re_x$.

В специальных условиях, искусственно уменьшая возмущенность потока (например, путем полировки внутренних стенок, выполнения плавного входа в трубу и исключения сотрясений) можно получить ламинарное течение при $Re>Re_x$. Однако такой ламинарный режим весьма неустойчив, при малейшем возмущении мгновенно переходит в турбулентный и поэтому в обычных условиях не встречается.

Из выражения (3.1.) следует, что числа Рейнольдса малы и, следовательно, ламинарный режим наиболее вероятен при малых скоростях течения в каналах незначительного поперечного сечения (в порах грунта, капиллярах) или при движении жидкостей с большей вязкостью (нефть, масло, битум). Турбулентный режим встречается чаще в реках, ручьях, открытых каналах, системах водоснабжения и водоотведения, а также при течении бензина, керосина и других маловязких жидкостей в трубах.

3.2. Описание устройства 3

Устройство 3 для изучения режимов движения жидкости имеет прозрачный корпус (рис.3.1, а) и включает баки 1 и 2 с успокоительной стенкой 3 для гашения возмущений жидкости от падения струй и всплывания пузырей воздуха. Баки 1 и 2 соединены параллельными каналами 4 и 5. Для удобства визуальных наблюдений они имеют прямоугольные поперечные сечения одинаковых размеров. Конец канала 4 снабжен

перегородкой со щелью 6, а противоположный конец канала 5 - решеткой (перегородкой с множеством отверстий) 7.

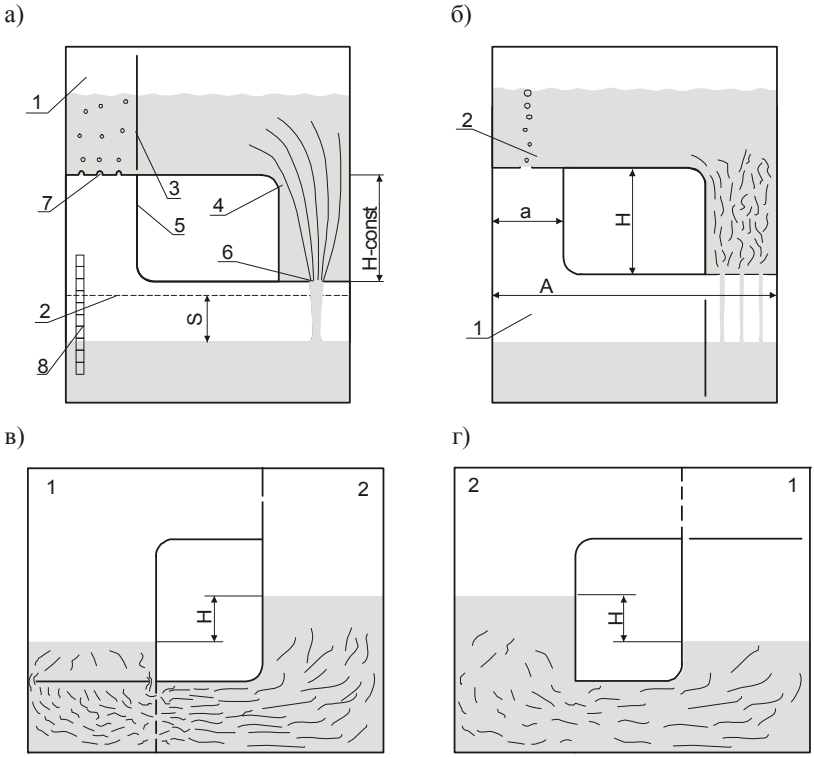


Рис.3.1.

Устройство заполнено водой, содержащей микроскопические частицы алюминия для визуализации течения. Уровень воды в баке 2 определяется по шкале 8, а ее температура считывается с термометра, находящегося в устройстве 1.

Устройство работает следующим образом. В положениях устройства, изображенных на рис.3.1, а, б, поступающая через правый канал в нижний бак вода вытесняет воздух в виде пузырей в верхний бак. Давления на входе в канал (на дне верхнего бака) и над жидкостью в нижнем баке уравниваются и

поэтому истечение происходит под действием постоянного напора H, создаваемого столбом жидкости в правом канале. Так обеспечивается установившееся (с постоянным во времени расходом) движение жидкости. Причем в канале 4 устанавливается ламинарный режим благодаря низким скоростям течения из-за большого сопротивления щели 6. В свою очередь малое гидравлическое сопротивление решетки 7 обеспечивает получение турбулентного течения в канале 5 за счет больших скоростей (см.рис.3.1, б). Расход можно изменять наклоном устройства с помощью подставки (см.описание устройства 5). В случаях, указанных на рис.3.1, в, г, в каналах 4 и 5 возникает неустановившееся (при переменном напоре и расходе) движение жидкости за счет непосредственного соединения воздушных полостей баков. Это позволяет проследить за изменением структуры потоков в процессе уменьшения их скорости до нуля.

3.3. Порядок выполнения работы

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

2. Измерить время t перемещения уровня воды в баке 2 на некоторое расстояние S и ее температуру T.

3. Сделать зарисовку структуры потока и подсчитать число Рейнольдса по порядку, указанному в табл.3.1.

4. Повернуть устройство в его плоскости на 180°C (см.рис.3.1, б). Наблюдать турбулентный режим в канале 5. При этом выполнить операции по п.п. 2.3.

5. При заполненном водой баке 2 поставить устройство так, чтобы канал 5 занял нижнее горизонтальное положение (см.рис.3.1, в). Наблюдать в канале процесс перехода от турбулентного режима движения к ламинарному. Обратить внимание, что решетка приводит к турбулизации потока за ней.

6. При заполненной водой баке 2 поставить устройство так, чтобы канал 4 занял нижнее горизонтальное положение

(см.рис.3.1, г). Наблюдать за структурой потока при внезапном сужении в баке 2, внезапном расширении в канале за щелью и при выходе потока из канала в бак 1. Обратить внимание на циркуляционные (вальцовые) зоны. Сделать зарисовку картины течения.

Таблица 3.1.

Наименования величин	**Обознач., формулы**	**Режим движения**	
		Ламинарный	**Турбулентный**
1.Изменение уровня воды в баке, см	S		
2. Время наблюдения за уровнем, с	t		
3.Температура воды, $^{\circ}$C	T		
4.Кинематический коэффициент вязкости воды, см^2/с	$\nu=17.9/(1000+34T+0.22T^2)$		
5.Площадь поперечного сечения канала, см^2	$\omega=ab$		
6.Смоченный периметр, см	$\chi=2(a+b)$		
7. Гидравлический диаметр канала, см	$d_г=4\omega/\chi$		
8.Объем воды, поступивший в бак за время t, см^3	$w=ABS$		

9. Расход воды, $см^3$ /с	$Q=W/t$		
10. Средняя скорость течения в канале, см/с	$V=Q/\omega$		
11. Число Рейнольдса	$Re=Vd_э/\nu$		

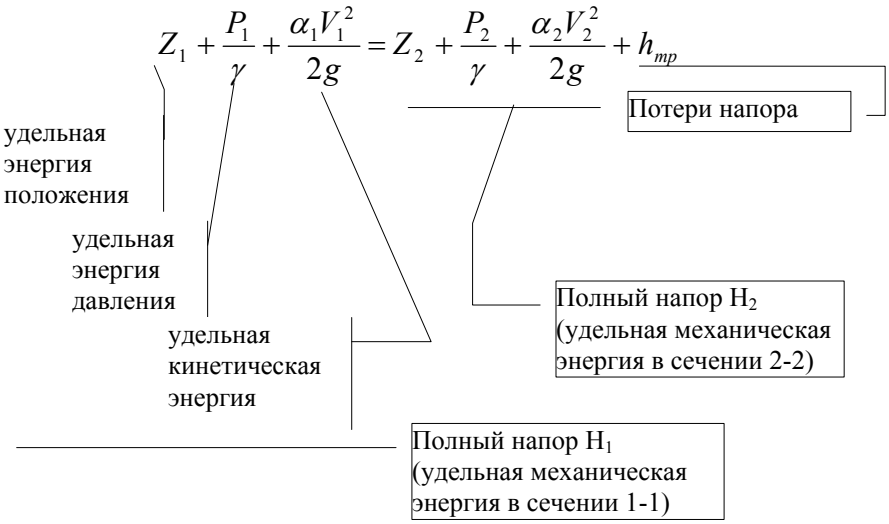
Примечание. Размеры поперечного сечения канала (а,в) и бака (А.В) указаны на корпусе устройства.

РАБОТА 4. ИЛЛЮСТРАЦИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Цель работы. Опытное подтверждение уравнения Д.Бернулли для установившегося потока жидкости в канале переменного сечения: наблюдение понижения механической энергии по течению и перехода потенциальной энергии в кинетическую и обратно.

4.1. Общие сведения

Уравнение Д.Бернулли для установившегося потока реальной несжимаемой жидкости выражает закон сохранения энергии и имеет вид:



где Z - расстояние от произвольно выбранной горизонтальной плоскости отсчета 0-0 до любой точки рассматриваемого сечения потока (рис.4.1.);

P - давление в выбранной точке сечения;

γ - удельный вес жидкости;

α - коэффициент кинетической энергии (коэффициент Кориолиса); для ламинарного течения $\alpha = 2$, для турбулентного обычно принимают $\alpha = 1{,}1$;

V - средняя скорость потока

g - ускорение свободного падения;

h_{mp} - суммарные потери напора на преодоление гидравлических сил трения между сечениями 1-1 и 2-2.

Индексы "1" и "2" указывают номер сечения, к которому относится величина. Сечения, связываемые уравнением, выбираются на участках с плавноизменяющимся движением жидкости, хотя между ними движение может быть и резкоизменяющимся.

Легко установить, что слагаемые уравнения (4.1.) измеряются в единицах Дж/ Н $\rightarrow$ энергия/сила и поэтому

выражают тот или иной вид удельной (отнесенной к весу жидкости) энергии. Названия энергий указаны под уравнением. Механическую энергию единицы веса жидкости в гидравлике принято называть напором: $Z + \frac{P}{\gamma}$ - пьезометрическим, $\frac{\alpha \cdot V^2}{2g}$ - скоростным,

$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha \cdot V^2}{2g} = H$ - полным.

Из уравнения следует, что в случае отсутствия теплообмена потока с внешней средой полная удельная энергия (включая тепловую) неизменна вдоль потока и поэтому изменение одного вида энергии приводит к противоположному по знаку изменению другого. Таков энергетический смысл уравнения Бернулли.

Следует знать, что уравнение Бернулли в форме (4.1.) является наиболее наглядным и удобным для решения широкого круга задач, имеет прикладное значение в практике измерений на Земле, т.к. каждое его слагаемое легко определяется простейшими приборами. Однако в условиях отсутствия или переменного гравитационного ускорения теряет смысл. В таких случаях более строгой является форма записи уравнения, в которой энергии отнесены к массе, а не к весу (силе тяжести) жидкости. Для получения этой формы достаточно все слагаемые уравнения (4.1.) перемножить на ускорение силы тяжести g.

Геометрический смысл уравнения (4.1.) заключается в том, что его слагаемые могут быть измерены в линейных единицах (единицах напора) (Дж/Н = Н·м/Н = м) геометрический напор Z, пьезометрически напор $\frac{P}{\gamma}$, скоростной напор $\frac{\alpha \cdot V^2}{2g}$ и потерянный напор h. Измерение указанных высот простейшими приборами (мерной линейкой, пьезометром, трубкой Пито) и графическая иллюстрация уравнения Бернулли показаны на рис. 4.1.

Линия, соединяющая уровни жидкости в пьезометрах, называется пьезометрической. Она иллюстрирует изменение потенциальной энергии (пьезометрического напора) по длине потока, так как расположена над плоскостью отсчета на расстоянии $Z+\frac{P}{\gamma}$. Линия, проведенная через уровни жидкости в трубках Пито, отражает распределение полной удельной механической энергии (полного напора) вдоль потока и именуется напорной. Падение полного напора $h_{тр}$, приходящееся на единицу длины потока, называется гидравлическим уклоном

$$I=\frac{h_{тр}}{\ell}.$$

Линии удельной энергии (напорная и пьезометрическая) дают наглядное представление о переходе одного вида энергии в другой по длине потока и позволяют при решении многих задач инженерной практики установить значения, причины и степень изменяемости основных параметров движения жидкости. Линии удельных энергий строятся в соответствии с нижеприведенными правилами, вытекающими из уравнения Бернулли.

1. Напорная линия (полный напор $H=Z+\frac{P}{\gamma}+\frac{\alpha\cdot V^2}{2g}$ постоянно понижается по течению (если на рассматриваемом участке нет насоса) ввиду необратимого преобразования механической энергии в тепловую при преодолении потоком сил гидравлического трения. Причем уклон линии (потери напора $h_{тр}$) тем больше, чем меньше сечение участка потока (см. рис.4.1.).

2. Пьезометрическая линия (пьезометрический напор $Z+\frac{P}{\gamma}$) в отличие от напорной, может не только понижаться, но и повышаться по течению. Это происходит при расширении потока (см.рис.4.1) и объясняется уменьшением скорости и

кинетической энергии $\frac{\alpha \cdot V^2}{2g}$, часть которой в силу сохранения баланса переходит в потенциальную энергию $Z + \frac{P}{\gamma}$. Другими словами, понижение скорости потока V приводит к возрастанию давления P по течению.

Пьезометрическая линия проходит через центр тяжести выходного сечения канала (трубопровода) при истечении жидкости в атмосферу, и ниже оси канала, если давление в нем менее атмосферного.

3. Расстояние между пьезометрической и напорной линиями численно равно кинетической энергии

$$\frac{\alpha \cdot V^2}{2g} = \frac{\alpha \cdot Q^2}{2g\omega^2} = \frac{8\alpha \cdot Q^2}{g\pi^2 d^2}$$

и поэтому обратно пропорционально диаметру сечения потока в четвертой степени. Для участков потока постоянного сечения средние скорости одинаковы по пути, поэтому линии удельных энергий, как правило, параллельны между собой (см.рис.4.1). Эти линии для потоков в конфузорных (конически сходящихся) патрубках расходятся, а в диффузорных (конически расходящихся) - сходятся. В баках и водоемах, где жидкость не движется V = 0, линии энергий совпадают со свободной поверхностью, если она находится под атмосферным давлением.

4.2. Описание устройства 4

Устройство 4 для опытного подтверждения уравнения Бернулли имеет прозрачный корпус и содержит баки 1 и 2, отделенные друг от друга прозрачной объемной перегородкой 3 (рис.4.2, а). В перегородке выполнены опытные каналы 4 и 5 переменного и постоянного сечения. Каналы соединены между собой равномерно расположенными пьезометрами 1 - 7, служащими для измерения пьезометрических напоров в

характерных сечениях. Устройство частично заполнено подкрашенной водой. Для измерения уровня воды в одном из баков предусмотрена шкала 6 с миллиметровой ценой делений.

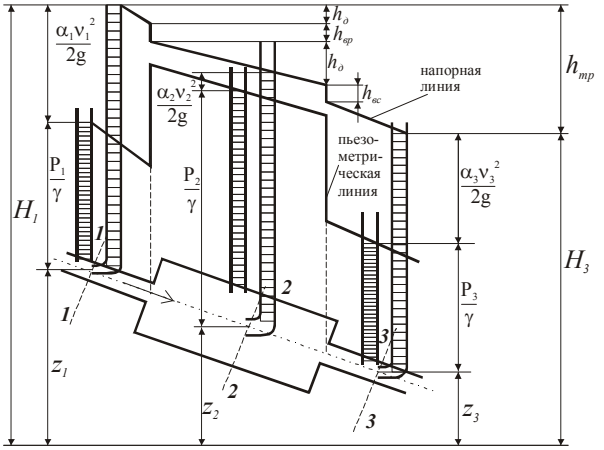
В положениях устройства, изображенных на рис.4.2, а, б, благодаря постоянству напора истечения H_0 во времени обеспечивается установившееся движение воды в нижнем канале. Верхний канал в это время пропускает воздух, вытесняемый жидкостью из нижнего бака в верхний. Следует отметить, что напор истечения испытывает колебания, вызываемые силами поверхностного натяжения при образовании и отрыве пузырей на выходном конце верхнего канала. Однако ввиду малости такие изменения напора в расчетах не учитываются. Расход в каналах может варьироваться наклоном устройства (см.описание устройства 5).

4.3. Порядок выполнения работы

1. Измерить стороны А, В поперечного сечения бака 1 и полный напор на входе в канал, равный межосевому расстоянию каналов.

2. При заполненном водой баке 1 поставить устройство на стол баком 2 (см.рис.4.2, а).

3. Снять показания пьезометров $\frac{P}{\gamma}$ по нижним частям менисков воды.



а) б)

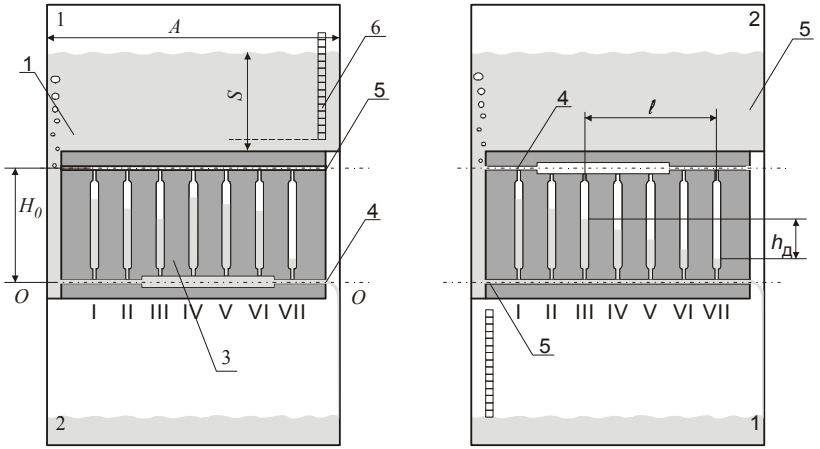


Рис.4.2

4. Секундомером определить время t изменения уровня в баке 1 на величину S. Значения замеренных величин и площади ω сечений потока (указаны на корпусе устройства) внести в табл.4.1. Площадь потока в сечении 3 определяется сечением транзитной струи и поэтому принимается равной площади в сечении 2.

5. Подсчитать значения полных напоров в сечениях канала 4 по порядку, указанному в табл.4.1. Коэффициент кинетической энергии принять равным $\alpha = 1.1$.

6. На миллиметровой бумаге вычертить в масштабе схему канала 4 с пьезометрами. Плоскость отсчета 0-0 провести через ось канала, что позволяет исключить из рассмотрения ординату Z. По показаниям пьезометров нанести пьезометрическую линию, заканчивающуюся в центре тяжести выходного сечения канала 4. Для построения напорной линии отложить в каждом сечении от плоскости отсчета полные напоры в виде отрезков и соединить их концы. Для жидкости в баке 1 напорная и пьезометрическая линии горизонтальны и проходят на уровне оси канала 5.

7. Объяснить ход линий удельных энергий с использованием правил раздела 4.1. и проанализировать переход одного вида энергии в другой.

Таблица 4.1.

Наименование величин	Обозначения, формулы	Сечение потока						
		1	2	3	4	5	6	7
1.Площадь сечения потока, $см^2$	ω							
2.Средняя скорость в сечении, см/с	$V = \frac{Q}{\omega}$							
3.Пьезометрический напор (показания пьезометров), см	$\frac{P}{\gamma}$							
4.Скоростной напор, см	$\frac{\alpha \cdot V^2}{2g}$							
5.Полный напор, см	$\frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha \cdot V^2}{2g}$							

6.Размеры сторон поперечного сечения бака, см	A, B	A=21; B=4
7.Перемещение уровня воды в баке, см	S	
8.Время наблюдения за изменением уровня, с	t	
9.Расход, $см^3$ /с	$Q = \frac{ABS}{t}$	
10.Полный напор на входе в канал, см	H_0	10

РАБОТА 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА ПО ДЛИНЕ

Цель работы: освоение экспериментального и расчетного способов определения потерь напора по длине при напорном равномерном течении жидкости.

5.1. Общие сведения

Нахождение потерь напора (потерь удельной механической энергии) при движении жидкостей составляет одну из основных задач практической гидравлики. В зависимости от потерь напора в гидросистемах назначаются диаметры трубопроводов, высота расположения баков, напор и мощность насосов.

Полные потери напора $h_{тр}$ на преодоление сил гидравлического трения при течении жидкости складываются из потерь напора по длине $h_д$ и местных потерь напора $h_м$:

$$h_{тр} = h_д + h_м$$

Потери напора по длине вызваны тормозящим действием стенок, приводящим к вязкостному трению частиц и струек жидкости друг от друга вдоль трубопроводов. Такие потери при равномерном течении пропорциональны длине потока и для круглых труб (каналов) определяются по формуле Дарси-Вейбаха

$$h_д = \frac{\lambda \cdot \ell \cdot V^2}{d \cdot 2g} \qquad (5.1)$$

где λ - коэффициент гидравлического трения или коэффициент Дарси;

l, d - соответственно длина и внутренний диаметр трубы (канала);

V - средняя скорость потока.

На рис.5.1 в логарифмических координатах представлены результаты опытов К.Кольбрука по исследованию гидравлического сопротивления технических труб. Из рисунка видно, что коэффициент трения λ в общем случае зависит от числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости стенок трубы Δ/d (где Δ - средняя высота выступов шероховатости стенок или абсолютная шероховатость).

При ламинарном режиме (при Re < 2300) коэффициент трения вычисляется по теоретической формуле Ж.Пуазейля, по которой на графике построена линия ламинарного режима $\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}$.

Подставляя это выражение для λ в формулу (5.1) и расписывая число Рейнольдса $\mathrm{Re} = \frac{Vd}{\nu}$, получаем, что в ламинарном потоке потери напора по длине пропорциональны средней скорости в первой степени ($h \sim V^1$),

При турбулентном режиме течения различают области гидравлически гладких и шероховатых труб (стенок).

Трубу или стенку считают гидравлически гладкой, если соблюдается условие

$$2300 < \mathrm{Re} < 10\frac{d}{\Delta}.$$

В этом случае прилегающий к стенке ламинарный подслой турбулентного потока покрывает выступы шероховатости и поток не испытывает дополнительных завихрений от шероховатости. Поэтому в области гидравлически гладких труб, как и в ламинарном режиме, λ зависит только от числа Рейнольдса и вычисляется по эмпирической формуле Г.Блазиуса

$$\lambda = \frac{0{,}316}{\mathrm{Re}^{0{,}25}}$$

По этой формуле на рис.5.1 построена наклонная нижняя прямая, описывающая область гладких труб до $\mathrm{Re} = 10^5$. Подставляя выражение для λ в формулу (5.1) легко показать, что в этой области $h_\partial \sim V^{1.75}$

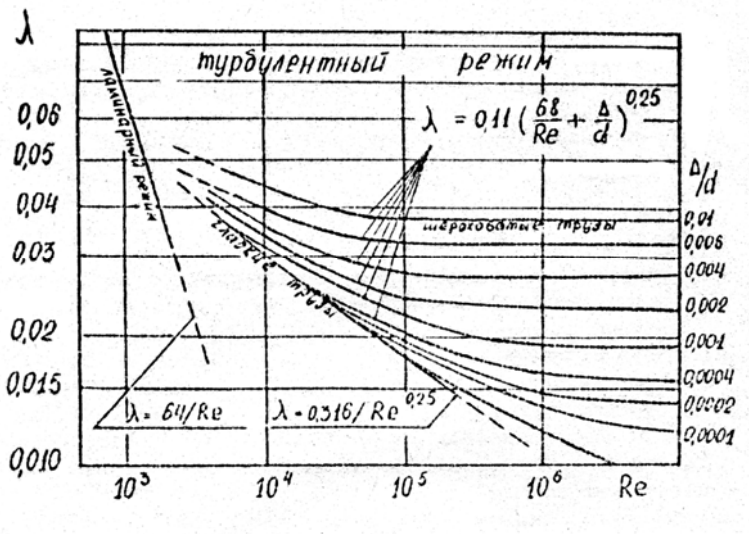


Рис.5.1

С увеличением числа Рейнольдса, например, за счет повышения скорости течения, толщина ламинарного подслоя турбулентного потока уменьшается и при

$$\mathrm{Re} > 10\frac{d}{\Delta}$$

выступы шероховатости оголяются. Они начинают вносить дополнительные возмущения (вихри) в турбулентное ядро потока, что приводит к возрастанию потерь напора; в этом случае труба (стенка) называется гидравлически шероховатой. Область шероховатых труб представлена на графике семейством кривых, находящихся правее линии гладких труб и описываемых формулой А.Д.Альтшуля

$$\lambda = 0{,}11\left(\frac{68}{\mathrm{Re}} + \frac{\Delta}{d}\right)^{0{,}25}$$

Формула указывает на увеличение коэффициента трения λ с возрастанием относительной шероховатости $\frac{\Delta}{d}$ стенок. При достаточно больших числах Рейнольдса $\mathrm{Re} \to \infty$, когда практически отсутствует ламинарный подслой, коэффициент λ не зависит от Re. Он определяется лишь относительной шероховатостью $\frac{\Delta}{d}$ стенок и поэтому кривые графика переходят в горизонтальные прямые, а потери напора по длине становятся пропорциональными квадрату средней скорости ($h_д \sim V^2$). Эту часть области шероховатых труб называют зоной квадратичного сопротивления.

Итак, для вычисления потерь напора по длине необходимо предварительно выявить область сопротивления (область ламинарного движения, область гладких или область шероховатых стенок турбулентного движения), а затем определять коэффициент трения по соответствующим этим областям формулам. Потери напора в трубах некруглого сечения можно определять по формулам для круглых труб, подставляя в них вместо геометрического гидравлический диаметр $d = d_г$.

Вышеприведенные формулы пригодны для вычисления коэффициента трения при равномерном течении, которое устанавливается в трубе (канале) постоянного сечения на некотором расстоянии от входа. Участок, предшествующий наступлению равномерного движения жидкости, называется

начальным (разгонным). Он характеризуется повышенными потерями напора, что объясняется неравномерностью течения из-за изменения эпюры скоростей (несмотря на постоянство средней скорости) по пути. Так, например, на входе из резервуара в трубу частицы жидкости имеют одинаковую по сечению скорость, а по мере удаления от входа замедляются у стенок и ускоряются на оси потока.

Переформирование эпюры скоростей сопровождается дополнительным расходом энергии и завершается в конце начального участка. Длина начальных участков и потери напора на них определяются по специальным формулам, приведенным в справочной литературе по гидравлике.

В общем случае потери напора в ходе опытов определяются разностью полных напоров на концах рассматриваемого участка потока. Однако при равномерном движении кинетический напор не изменяется по пути и поэтому потери напора равны разности только пьезометрических напоров, то есть находятся как разность показаний пьезометров, установленных на концах опытного участка канала (трубы).

5.2. Порядок выполнения работы

1. При заполненном водой баке 2 поставить устройство 4 на стол баком 1 (см.рис.4.2, б).

2. Снять показания пьезометров 1 - 7, измерить расстояние между ними и время t измерения уровня в баке 1 на произвольно заданную величину S.

3. Снять показания термометра, находящегося в устройстве 1, измерить стороны A и B поперечного сечения бака 1.

4. Значения замеренных величин внести в табл.5.1. Размеры сторон a и b поперечного сечения канала указаны на корпусе устройства.

5. На бумаге с миллиметровой сеткой изобразить в масштабе канал 5 с пьезометрами и построить по показаниям пьезометров пьезометрическую линию. На этой линии выделить

участок с постоянным уклоном, соответствующий равномерному течению. Определить его длину l и опытное значение потерь h_∂ разностью показаний крайних пьезометров на нем (см.рис.4.2, б).

6. Найти число Рейнольдса для исследуемого режима течения и расчетное значение потерь напора h_∂ на участке равномерного течения воды в канале 5 по порядку, указанному в табл.5.1.

7. Найти относительное расхождение опытного и расчетного значений потерь напора. Объяснить это расхождение.

Таблица 5.1.

Наименование величин	Обозначения, формулы	Значения величин
1.Размеры поперечного сечения канала, см	**a, b**	
2.Размеры поперечного сечения бака, см	**A, B**	
3. Температура воды, С	**T**	
4. Изменение уровня воды в баке, см	**S**	
5. Время наблюдения за изменением уровня, с	**t**	
6.Показания пьезометров, см	$\frac{P_1}{\gamma}, \dots, \frac{P_7}{\gamma}$	
7. Расстояние между крайними пьезометрами на участке равномерного движения, см	ℓ	
8. Опытное значение потерь напора по длине, см	$h_\partial = \frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_7}{\gamma}$	

9. Расход воды, $см^3/с$	$Q = \frac{ABS}{t}$	
10.Гидравлический диаметр канала, см	$d_г = \frac{2ab}{a+b}$	
11.Средняя скорость в канале, см/с	$V = \frac{Q}{ab}$	
12.Кинематический коэффициент вязкости воды, $см^2/с$	$\nu = \frac{17.8}{1000 + 34T + 0.22T^2}$	
13.Число Рейнольдса	$\mathrm{Re} = \frac{Vd_г}{\nu}$	
14.Коэффициент трения при Re < 2300 2300 < Re < 10 d/Δ Re > 10 d/Δ	$\lambda = 64/\mathrm{Re}$ $\lambda = 0{,}316/\mathrm{Re}^{0,25}$ $\lambda = 0{,}11\left(\frac{68}{\mathrm{Re}} + \frac{\Delta}{d_2}\right)^{0,25}$	
15.Расчетное значение потерь напора по длине,см	$h'_д = \lambda \frac{\ell}{d_г} \frac{V^2}{2g}$	
16.Относительное расхождение опытного и расчетного значений потерь	$\delta_h = \frac{(h_д - h'_д)}{h'_д}$	

Примечание. Абсолютную шероховатость стенок канала принять равной Δ = 0,001 мм.

РАБОТА 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТНЫХ ПОТЕРЬ НАПОРА

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

6.1. Общие сведения

Местные потери напора (энергии жидкости) возникают на коротких участках трубопровода с препятствиями для потока, называемыми местными сопротивлениями. К местным гидравлическим сопротивлениям относятся внезапное расширение и сужение труб, вентили, задвижки, клапаны, колена, решетки, сетки и другие элементы гидросистем, изменяющие конфигурацию стенок трубы или канала. Местные сопротивления вызывают изменение скорости движения жидкости по величине и направлению, что почти всегда приводит к отрыву потока (транзитной струи) от стенок и возвратному течению жидкости около них, то есть к образованию циркуляционных зон (рис.6.1, а). Механическая энергия потока, поглощаемая циркуляционными зонами для создания и поддержания вращения жидкости, составляет, в основном, местные потери напора (механической энергии).

Величина местных потерь напора экспериментально определяется разностью полных напоров жидкости до и после местного сопротивления. Например, потери напора на внезапное расширение горизонтального потока (см.рис.6.1, а)

$$h_м = h_{в.р.} = H_1 - H_2 = \left[\frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g}\right] - \left[\frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2g}\right]$$

Если диаметры трубы до и после местного сопротивления одинаковы - скоростные напоры $\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}$. Поэтому местные потери напора, как и в случае потерь напора по длине трубопровода постоянного сечения, измеряются только

разностью показаний пьезометров. Так, потери напора на диафрагме, установленной в трубе постоянного сечения (см.рис.6.1, б)

$$h_м = \frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma}$$

При этом мерные сечения 1-1 и 2-2 (сечения для установки пьезометров) выбирают с таким расчетом, чтобы в них соблюдались условия плавно изменяющегося движения и транзитная струя полностью заполняла трубу.

Следует заметить, что для более точного определения местных потерь, из вышеуказанных выражений нужно вычесть потери по длине на участке с местным сопротивлением. Однако ввиду малости рассматриваемого участка и значений потерь напора по длине, ими обычно пренебрегают.

В инженерных расчетах для определения потерь механической энергии на местных сопротивлениях используется формула Ю.Вейсбаха, выражающая потери в долях от скоростного напора

$$h_м = \frac{\xi \cdot V^2}{2g} \qquad (6.1)$$

где ξ - коэффициент местного сопротивления;

V - средняя скорость потока за местным сопротивлением.

В большинстве случаев при подсчете местных потерь напора по формуле (6.1) используются в основном справочные эмпирические значения ξ, которые зависят от геометрии местных сопротивлений и числа Re. Теоретические формулы для определения потерь напора получены только для простейших видов местных сопротивлений. Так, принято считать, что потери напора в случае внезапного расширения трубопровода при Re>3000 с достаточным приближением выражаются теоретической формулой Ж.Борда

$$h_{в.р.} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2n} \qquad (6.2)$$

где V_1 и V_2 - средние скорости движения до и после расширения. Из формулы (6.2) следует, что потери напора вследствие внезапного расширения равны скоростному напору потерянной скорости. Эта формула с помощью уравнения неразрывности $V_1\omega_1 = V_2\omega_2$ может быть приведена к виду формулы (6.1), откуда следует, что

$$\xi_{в.р..} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2 \qquad (6.3)$$

При внезапном сужении канала (диафрагма в трубе, резкое уменьшение диаметра трубы) струя жидкости, пройдя отверстие площадью ω_0 сжимается и достигает наименьшей площади ω_c в сечении С-С (см.рис.6.1, б, в). Затем струя постоянно расширяется, пока площадь ее сечения не станет равна площади сечения трубы $\omega_г$. При турбулентном движении местные потери при этом равны потерям напора на участке расширения струи. Поэтому коэффициенты рассматриваемых местных сопротивлений определяются по формуле (6.3), где вместо ω_1 подставляется значение ω_c, определяемое из формулы А.Д.Альтшуля

$$\omega_c = \omega_0\left[0.57 + \frac{0.043}{1.1 - \omega_0/\omega_1}\right] \qquad (6.4)$$

При входе в трубу из резервуара, являющимся частным случаем внезапного сужения, коэффициент сопротивления входа при острых кромках $\xi_{вх}$ = 0.4 - 0.5, что соответствует значению коэффициента, определенного из формул (6.4) и (6.3) при $\omega_0/\omega_1 \to \omega_0 / \omega_1 \to \infty$. При закругленных кромках $\xi_{вх}$ = 0.2 и при плавном входе $\xi_{вх}$ = 0.05. Эти значения коэффициентов указаны для турбулентного режима движения жидкости, который присутствует в местных сопротивлениях в подавляющем большинстве случаев. При этом значения коэффициентов приобретают постоянные значения, не зависящие от числа Re.

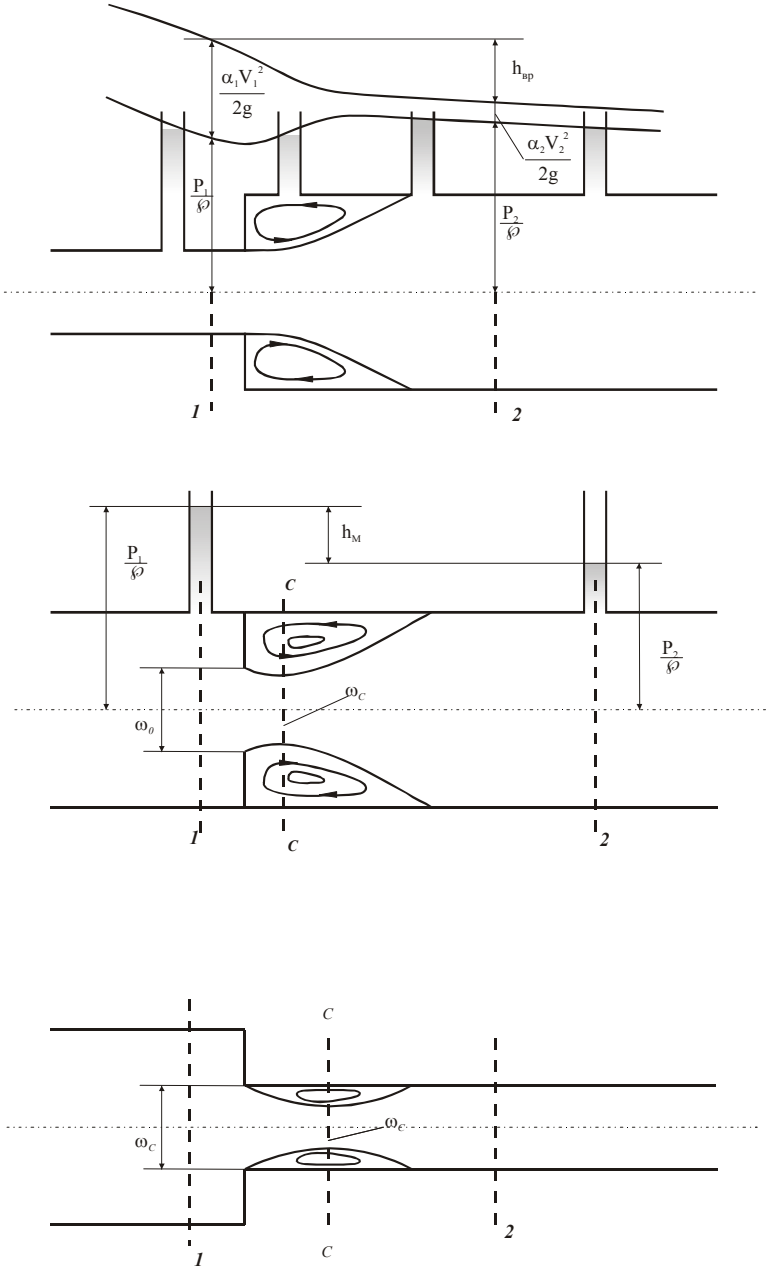

$\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}$
$h_{вр}$
$\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}$
$\frac{P_1}{\wp}$
$\frac{P_2}{\wp}$
1
2
$h_м$
C
ω_C
ω_0

Рис.6.1

6.2. Порядок выполнения работы

1. Измерить стороны А и В поперечного сечения бака 1 и межосевое расстояние H_0 каналов 4 и 5 в устройстве 4.

2. При заполненном водой баке 1 поставить устройство 4 на стол баком 2 (см.рис.4.2, а).

3. Снять показания пьезометров 1, 2, 5-7 по нижним частям менисков воды.

4. Секундомером определить время t изменения уровня в баке 1 на произвольно заданную величину S .

5. Измерения по п.п.3 и 4 выполнить три раза. Среднее арифметическое значение измеренных величин и указанные на корпусе устройства площади мерных сечений внести в табл.6.1.

6. Подсчитать значения расхода, полных напоров(при α = 1.1), опытных и расчетных значений местных потерь напора на исследуемых гидравлических сопротивлениях, а затем оценить их расхождение. Объяснить причину расхождения опытных и расчетных значений местных потерь.

Примечание. Полный напор H_1 в баке 1 перед входом в канал 4 определить разностью $H_1 = H_0 - \Delta h$ напора H_0 и величины Δ, затрачиваемой на преодоление сил поверхностного натяжения при образовании пузырей на конце канала 5

$$\Delta h = \frac{4\sigma}{d\gamma},$$

где коэффициент поверхностного натяжения σ для воды принимается равным 73 10 Н/м, удельный вес $\gamma = 9{,}8*10^3$ Н/м^3 . В формуле через d обозначен гидравлический диаметр выходного сечения канала 5.

Значение коэффициента местных потерь на вход принять в соответствии с п.6.1.

Таблица 6.1

Наименование величин	Обозначение, формулы	Вид сопротивления					
		Вход		Расширение		Сужение	
		1(0)	2(1)	1(3)	2(6)	1(6)	2(7)
1.Площади сечений, $см^2$	ω						
2.Показания пьезометров, см	$\frac{P}{\gamma}$						
3.Средние скорости в сечениях, см/с	$V = \frac{Q}{\omega}$						
4.Скоростные напоры в сечениях, см	$\frac{\alpha \cdot V^2}{2g}$						
5.Полные напоры в сечениях, см	$H = \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha \cdot V^2}{2g}$						
6.Изменение уровня воды в баке, см	S						
7.Время наблюдения за уровнем, с	T						
8.Расход воды,$см^3$ /с	$Q = \frac{ABS}{t}$						
9.Опытные значения местных потерь, см	$h_м = H_1 - H_2$						
10.Площадь	ω_c			–	–		

сжатого сечения по формуле (6.4), см							
11.Коэффициенты местных потерь	$\xi = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2$ $\xi = \left(\frac{\omega_2}{\omega_c} - 1\right)^2$			–	–	–	–
12.Расчетные значения местных потерь, см	$h_м = \frac{\xi \cdot V^2}{2g}$						
13.Относительное расхождение опытных и расчетных значений потерь	$\delta_h = \frac{h_м - h'_м}{h'_м}$						

Примечание. Размеры поперечного сечения бака:

A =.....см;

B = …..см.

Межосевое расстояние

H_0= ……см..

РАБОТА 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ

Цель работы. Экспериментальное определение коэффициентов истечения жидкости через малое круглое отверстие в тонкой стенке и внешний цилиндрический насадок.

7.1. Общие сведения

В гидравлике различают малые и большие отверстия. Малым называют отверстие, вертикальный размер которого существенно (в 5 - 10 раз) меньше напора истечения. В этом случае скорость вытекающей струи по сечению отверстия можно считать одинаковой. Если струя касается только кромки отверстия, то стенку, в которой выполнено отверстие, в гидравлическом смысле называют тонкой. Такой случай истечения наблюдается при острой кромке отверстия, либо при толщине стенки менее половины диаметра отверстия.

Струя на выходе из отверстия в тонкой стенке сжимается, достигая на некотором (около 0,5 диаметра отверстия) расстоянии наименьшего сечения, называемого сжатым. Явление сжатия объясняется свойством частиц жидкости, подходящих к отверстию с разных сторон, сохранять свое направление движения после прохождения отверстия. Степень сжатия струи оценивается коэффициентом сжатия

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}$$

где ω_c - площадь сжатого сечения струи;

ω - площадь отверстия.

Насадками называют патрубки длиной 3 - 4 диаметра, приставляемые к отверстию для увеличения расхода или придания струе особых свойств, например, дальнобойности.

При входе в цилиндрический насадок струя сначала сужается, отрываясь от стенок и образуя циркуляционную зону с пониженным давлением (ниже атмосферного в случае истечения в атмосферу), а затем постепенно расширяется и заполняет все сечение насадка. Сжатия струи при выходе из насадка не происходит, поэтому коэффициент сжатия для выходного сечения насадка $\varepsilon = 1$.

В инженерной практике скорость V и расход жидкости Q через отверстия и насадки определяют по формулам

$$V = \varphi \cdot \sqrt{2gH} \qquad (7.1)$$

$$Q = \mu\sqrt{2gH}$$

где φ - коэффициент скорости, учитывающий снижение скорости за счет гидравлического сопротивления отверстия или насадка и представляющий отношение действительной скорости истечения к скорости истечения идеальной жидкости;

H - напор истечения;

ω - площадь отверстия или выходного сечения насадка;

μ - коэффициент расхода, связанный с другими коэффициентами истечения соотношением

$$\mu = \varphi\omega$$

откуда видно, что μ учитывает снижение расхода, вызываемое гидравлическими сопротивлениями и сжатием струи.

В общем случае коэффициенты истечения μ, φ, ε зависит от числа Рейнольдса. На рис.7.1. приведены такие зависимости для малого отверстия в тонкой стенке (сплошные линии) и для внешнего цилиндрического насадка (пунктирная линия). Из рисунка следует, что при развитом турбулентном режиме истечения (при $Re>10^5$) численные значения коэффициентов становятся постоянными и равными:

для малых круглых отверстий в тонкой стенке

$\varphi = 0{,}97;$ $\varepsilon = 0{,}64;$ $\mu = 0{,}97*0{,}64 = 0{,}62;$

для внешнего цилиндрического насадка

$\varphi_н = 0{,}82;$ $\varepsilon_н = 1;$ $\mu_н = \varphi_н = 0{,}82.$

Сравнение указанных коэффициентов для отверстия и насадка показывает, что присоединение к отверстию внешнего цилиндрического насадка обеспечивает при развитом турбулентном режиме истечения увеличение расхода ($\nu_н > \mu$) примерно на 30%. Этот эффект объясняется большей площадью сечения струи на выходе из насадка, чем за отверстием в сжатом сечении ($\varepsilon_н > \varepsilon$), и более полным использованием исходной энергии напора на истечение. Так, на

выходе из отверстия скорость велика ($\varphi > \varphi_н$) и, следовательно, значительная часть энергии жидкости уносится струей и не используется на истечение. В насадке же, выходная скорость мала, так как часть напора затрачивается на подсасывание дополнительного количества жидкости из бака в зону пониженного давления.

Следует помнить, что при Re < 1000 применение насадка не только не увеличивает коэффициент расхода, но даже уменьшает его по сравнению с истечением из отверстия (см.рис.7.1).

Явление истечения жидкости из отверстий и насадков широко используется в технике. Так, истечение жидкости через отверстия в тонкой стенке - процесс, характерный в большинстве случаев для безнапорных водопропускных труб под насыпью дорог, расходомерных диафрагм, клапанов, распределителей, дросселей и других устройств гидросистем.

Роль цилиндрических насадков выполняют патрубки для выпуска жидкости из резервуаров и водоемов, а также всевозможные краны, дорожные напорные трубы. Конические сходящиеся насадки применяются для получения больших скоростей, силы и дальности полета струи в пожарных брандспойтах, форсунках для подачи топлива, фонтанных соплах, гидромониторах для размыва грунта. Конические расходящиеся насадки служат для замедления течения жидкости и увеличения расхода в пенных огнетушителях, струйных насосах, отсасывающих трубах гидравлических турбин.

7.2. Описание устройства 5

Устройство 5 для исследования истечения жидкости через отверстия и насадки имеет единый прозрачный корпус и содержит баки 1 и 2, отделенные друг от друга ступенчатой перегородкой (рис.7.2, а). В перегородке на одном уровне выполнено отверстие 3 с острыми кромками, а на другом уровне установлен внешний цилиндрический насадок 4. Устройство частично заполнено подкрашенной водой. Для измерения

уровней воды в баках и дальности полета струи предусмотрена шкала 5 с миллиметровой ценой деления. Установившееся течение воды обеспечивается неизменностью напора истечения во времени.

В вертикальном положении устройства (см.рис.7.2, а,б) можно определить коэффициенты расхода для отверстия и насадка. При наклонном положении устройства (см.рис.7.2, в , где показан вид устройства сбоку) представляется возможность по параметрам струи дополнительно определить численное значение коэффициента скорости из формулы

$$\varphi = \frac{l - \frac{h^2}{c}}{\sqrt{\frac{4Lh^2}{c}}} = \frac{l - \frac{hk}{K}}{\sqrt{\frac{4Lhk}{K}}}, \qquad (7.2)$$

где l – дальность полета струи;

h – расстояние от оси отверстия до задней стенки;

c – толщина слоя оставшейся над перегородкой воды;

L – расстояние между уровнями отверстия и насадка.

Вышеуказанное выражение получено с использованием системы уравнений:

$$x=Vt; \qquad (7.3)$$

$$y = \frac{gt^2}{2}, \qquad (7.4)$$

где x, y - координаты точки соприкосновения струи с задней стенкой устройства; за начало координат принят центр тяжести сжатого сечения; t - время движения частиц жидкости от сжатого сечения до места соприкосновения струи с боковой стенкой устройства.

Выразив φ из уравнения (7.1) и подставляя значение скорости V из формулы (7.3), а время t - из (7.4), получаем

$$\varphi = \frac{V}{\sqrt{2gH}} = \frac{x}{\sqrt{4Hy}},$$

откуда с учетом соотношений

$$x = \ell - a\,; \qquad a = h \cdot tg\alpha\,; \quad tg\alpha = \frac{h}{c}\,\mathrm{t};$$

$$H = L \cdot \sin\alpha\,; \qquad y = \frac{h}{\cos\alpha}\,,$$

окончательно находим расчетную зависимость (7.2).

Расход в устройстве 5 изменяется переводом его в наклонное положение с использованием подставки (см.рис.7.2, в, где показан вид устройства сбоку). Аналогично можно варьировать расход в устройствах 3 и 4. В этом случае стабилизированное значение напора истечения уменьшается и может быть определено по формуле

$$H = L \cdot \sin\alpha\,.$$

При этом угол наклона устройства вычисляется по одной из зависимостей

$$\alpha = arctg\frac{h}{c}, \qquad \alpha = arctg\frac{k}{K}.$$

7.3. Порядок выполнения работы

1. Измерить параметры A, B, L устройства 5 (см. рис.7.2) и зафиксировать показание T термометра, находящегося в составе комплекта. Значения этих величин и диаметров отверстия и насадка (указаны на корпусе устройства) внести в примечание табл.7.1.

2. При заполненном водой баке 1 поставить устройство вертикально

($\alpha = 90^{\circ}$) баком 2 на стол (см. рис.7.2, а) и наблюдать истечение через отверстие.

3. Секундомером определить время t перемещения уровня жидкости вдоль стенки одного из баков на некоторую величину S. Значения замеренных величин внести в табл.7.1.

4. Посчитать опытное значение коэффициента расхода μ по порядку, указанному в табл.7.1, а затем по найденному числу Рейнольдса определить справочное значение коэффициента расхода μ из графика (см.рис.7.1).

5. Найти относительное расхождение δ_{μ} между опытным μ и справочным μ значениями коэффициента расхода.

6. Поставить устройство вертикально ($\alpha = 90^{\circ}$) баком 1 на стол (см.рис.7.2, б) и наблюдать истечение жидкости через насадок. При этом выполнить операции по п.п. 3, 4, 5 и сравнить значения коэффициентов расхода для отверстия и насадка.

7. Установить устройство баком 2 на стол с наклоном с использованием подставки ($\alpha<90^{\circ}$, см.рис.7.2, в) и наблюдать истечение через отверстие. В ходе проведения опытов и обработки результатов повторить действия по п.п. 3, 4, 5 и дополнительно измерить дальность полета струи l , уровень с оставшейся над перегородкой воды или параметры k и K, а затем определить значения коэффициентов скорости φ и сжатия ε. Сверить их со справочными значениями из рис.7.1.

Обозначения: Диаметр отверстия d=...см; диаметр насадка $d_{н}$ =...см; размеры поперечного сечения бака: A=...см, B=...см; расстояние от оси отверстия до задней стенки h=...см; расстояние между уровнями отверстия и насадка L=...см; температура воды T=...$^{\circ}$C.

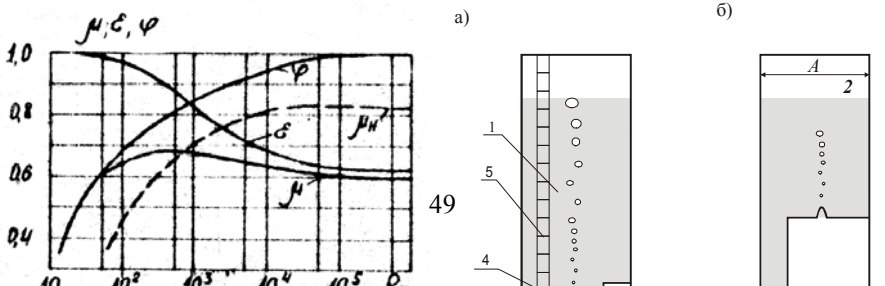


Рис.7.1

Рис.7.2

Таблица 7.1.

Наименование величин	Обозначения,	Отверстие	Насадок

	формулы	**α<90**	**α>90**	**α=90**
1.Перемещение уровня воды в баке, см	S			
2.Время наблюдения за уровнем воды, с	t			
3.Дальность полета струи, см	l			
4.Уровень оставшейся над перегородкой воды, см	c			
5.Угол наклона устройства, град.	$\alpha = arctg\frac{h}{c}$			
6.Напор истечения, см	$H = L \cdot \sin\alpha$			
7.Расход воды, $см^3/с$	$Q = \frac{ABS}{t}$			
8.Опытное значение коэффициента расхода	$\mu = \frac{Q}{\omega\sqrt{2gH}}$			
9.Коэффициент скорос-ти по формуле (7.2.)	φ			
10.Коэффициент сжатия струи	$\varepsilon = \frac{\mu}{\varphi}$			
11 Кинематический коэффициент вязкости по формуле (1.2.), $см^2/с$.	ν			
12.Число Рейнольдса	$\mathrm{Re} = \frac{d\sqrt{2gH}}{\nu}$			
13.Справочное значение коэффициента расхода	μ'			

(см.рис.7.1.)				
14.Относительное расхождение коэффициентов расхода	$\delta_{\mu} = \frac{\mu - \mu'}{\mu'}$			

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чугаев Р.Р. Гидравлика: Учебн.для вузов. - Л.: Энергоиздат, 1982. -672 с.

2. Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П. Гидравлика и аэродинамика. -М.: Стройиздат, 1987. -414 с.

3. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учеб. для машиностр. вузов/ Т.М.Башта, С.С.Руднев, Б.Б.Некрасов и др. - М.:Машиностроение, 1982. -423 с.

4. Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередач. Учеб.пособие для машиностр.вузов/ Под ред.С.С.Руднева и Л.Г.Подвидза. -М.:Машиностроение, 1974. - 416 с.

5. Лабораторный практикум по гидравлике, гидромашинам и гидроприводу: Учебн.пособие для втузов/ Я.М.Вильнер, И.П.Вопнярский, В.И.Кузменков, И.А.Шульпин; Под ред.Я.М.Вильнера. -Минск: Высш.шк. 1980. -224 с.

6. Справочник по гидравлике / В.А.Большаков, Ю.М.Константинов, В.Н.Попов и др. - К.: Вища шк., 1984. -343 с.

7. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение	3
Работа 1. Изучение физических свойств жидкости	3
Работа 2. Изучение гидростатического давления	11
Работа 3. Изучение режимов движения жидкости	17
Работа 4. Иллюстрация уравнения Бернулли	22
Работа 5. Определение потерь напора по длине	30
Работа 6. Определение местных потерь напора	37
Работа 7. Исследование истечения жидкости через отверстия и насадки	43
Литература	53

Вячеслав Иванович Максимов
Вячеслав Евгеньевич Юхнов

Лабораторный практикум по механике жидкости и газа. Методические указания к выполнению лабораторных работ по гидравлике по курсам «Гидравлика», «Механика жидкости и газа» и «Гидрогазодинамика» для студентов ТЭФ, ИГНД, ИЭФ

Подписано к печати.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная.
Печать RISO. Усл. печ. л. .Уч.-изд. л.
Тираж 200 экз. Заказ . Цена свободная.
Издательство ТПУ. 634050 Томск, пр.Ленина 30.