

ГИДРАВЛИКА

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ

УДК 621.22
ББК Ж123я73-5
Ж85

Рекомендовано Редакционно-издательским советом университета

Рецензент

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Прикладная механика и
сопротивление материалов» ТГТУ
В.Ф. Першин

Составители:

Н.П. Жуков, И.В. Рогов

Ж85 Гидравлика : лабораторные работы / сост. : Н.П. Жуков, И.В. Рогов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008.
– 32 с. – 200 экз.

Приведены лабораторные работы по дисциплинам «Гидрогазодинамика», «Гидравлика, гидравлические машины и гидропривод», «Гидравлика и гидравлические машины» (раздел гидравлики – гидростатика и гидродинамика): основное уравнение гидростатики, режимы течения жидкости, движение жидкости в трубе переменного сечения, гидравлические потери при движении вязкой (реальной) жидкости, истечение жидкости из отверстий и насадков, определение скорости и расхода жидкости.

Предназначены для студентов 2 и 3 курсов энергетических и технических специальностей (направлений) дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.22
ББК Ж123я73-5

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный
технический университет» (ТГТУ), 2008

Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

ГИДРАВЛИКА

Лабораторные работы
для студентов 2 и 3 курсов энергетических и технических специальностей
дневного и заочного отделений



Тамбов
◆ Издательство ТГТУ ◆
2008

Учебное издание

ГИДРАВЛИКА

Лабораторные работы

Составители:

ЖУКОВ Николай Павлович,
РОГОВ Иван Владимирович

Редактор Ю.В. Ш и м а н о в а

Инженер по компьютерному макетированию М.А. Филатова

Подписано в печать 10.12.2008.

Формат 60 × 84/16. 1,86 усл. печ. л. Тираж 200 экз. Заказ № 556.

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ГИДРОСТАТИКИ

Цель работы: экспериментальное подтверждение основного уравнения гидростатики.

Описание рабочего участка лабораторной установки

Для любых точек жидкости (рис. 1.1), находящейся в состоянии покоя, под действием сил тяжести, справедливо выражение (1.1), называемое полным гидростатическим напором и обозначаемое H :

$$H = z_i + \frac{p_i}{\rho g} = \text{const} . \quad (1.1)$$

Уравнение (1.1) называется основным уравнением гидростатики, а члены, входящие в него, имеют геометрическое и энергетическое толкование.

С геометрической точки зрения здесь z_i – геометрическая высота, или расстояние от выбранной горизонтальной плоскости сравнения (0–0) (рис. 1.1) до рассматриваемой точки по вертикали, м; $p_i/\rho g$ – пьезометрическая высота, или высота жидкости в пьезометре, м; ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

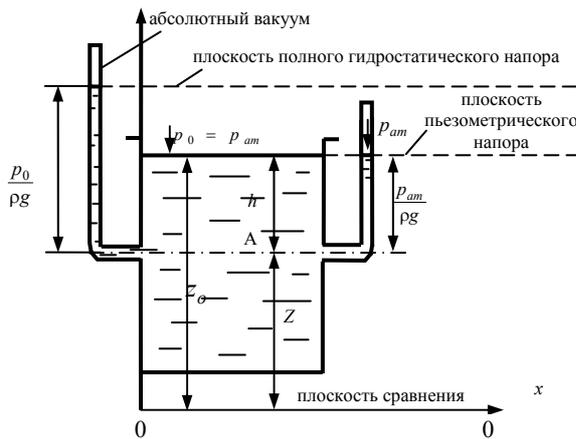


Рис. 1.1. Покоящаяся жидкость в открытом резервуаре

С энергетической точки зрения здесь z_i – геометрический напор, представляющий собой удельную, т.е. отнесённую к единице веса, потенциальную энергию положения, м (численно равен геометрической высоте); $p_i/\rho g$ – пьезометрический напор, представляющий собой удельную потенциальную энергию давления (работу сил давления), Дж/Н; величина $H = z_i + \frac{p_{atm}}{\rho g}$ называется гидростатическим напором; $p_i/\rho g = h = \frac{p_i - p_{atm}}{\rho g}$ – пьезометрическая высота, измеряемая открытым пьезометром или манометром; p_{atm} – атмосферное давление.

Гидростатический напор отличается от полного гидростатического напора на высоту столба жидкости, соответствующую атмосферному давлению $p_{atm}/\rho g$. Горизонтальная плоскость, проведённая на уровне H_s от плоскости сравнения, называется плоскостью гидростатического напора.

Записав уравнение (1.1) для двух точек, в одной из которых давление p_0 известно, и перегруппировав члены, можно получить:

$$z_i + \frac{p_i}{\rho g} = z_0 + \frac{p_0}{\rho g} ; \quad (1.2)$$

$$p_i = p_0 + \rho g(z_0 - z_i) .$$

С учётом того, что $h_i = z_0 - z_i$ – глубина погружения точки, получим из (1.2) математическое выражение закона Паскаля:

$$p_i = p_0 + \rho g h_i , \quad (1.3)$$

где p_0 – внешнее давление (в открытых сосудах оно равно атмосферному, $p_0 = p_{atm}$). Из (1.3) следует, что для любых h_i , т.е. для любой точки жидкости, внешнее давление передаётся без изменений.

Лабораторная установка (рис. 1.2) представляет собой резервуар 1, заполненный частично жидкостью (водой) и снабжённый манометрами.

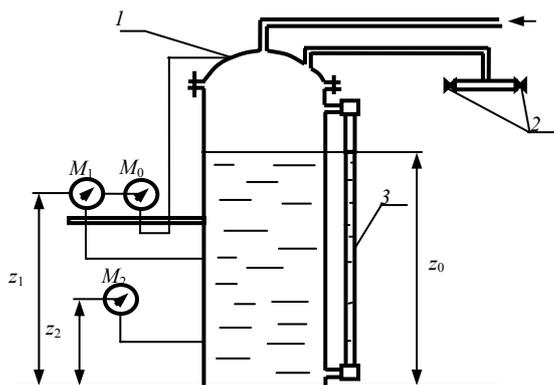


Рис. 1.2. Экспериментальная установка для проверки основного уравнения гидростатики

Манометры M_1 и M_2 служат для измерения избыточного давления, манометр M_0 – для измерения избыточного внешнего давления. Сжатый воздух от компрессора, подаётся в верхнюю часть резервуара. Связь резервуара с атмосферой (для выполнения условия $p_0 = p_{atm}$ при отключенном компрессоре) осуществляется с помощью вентиля 2. Высота уровня жидкости в резервуаре определяется по водомерной трубке 3.

Порядок выполнения работы

1. При закрытом вентиле 2 компрессором создать избыточное давление над свободной поверхностью (0,05...0,1) МПа, которое контролируется манометром M_0 .
2. Записать показания манометров M_0 , M_1 , M_2 с учётом перевода их в систему СИ, Па.
3. Измерить высоту уровня жидкости в резервуаре по водомерной трубке 3 и высоты расположения осей манометров M_1 и M_2 от плоскости сравнения.
4. Установить над свободной поверхностью покоящейся жидкости атмосферное давление, для чего выключить компрессор и плавно открыть вентиль 2.
5. Повторно записать показания манометров M_0 , M_1 , M_2 .
6. Данные экспериментов записать в протокол.

Протокол эксперимента

Режим	Измеряемая величина									
	M_0 кг/см ²	$p_{изб0}$ Па	M_1 кг/см ²	$p_{изб1}$ Па	M_2 кг/см ²	$p_{изб2}$ Па	z_0 м	z_1 м	z_2 м	H_s Дж/Н
1										
2										

Методические указания по обработке опытных данных

1. Гидростатический напор в точках

$$H_{si} = z_i + \frac{p_{избi}}{\rho g}, \text{ м.}$$

2. Глубина погружения выбранного сечения

$$h_i = (z_0 - z_i), \text{ м.}$$

3. Избыточное давление в точках 0, 1, 2

$$p_{избi}^* = \rho g h_i + p_{0изб}, \text{ Па.}$$

4. Сравнение измеренного избыточного давления $p_{избi}$ с вычислением $p_{избi}^*$ в тех же условиях и определение ошибки

$$\delta = \frac{p_{избi}^* - p_{избi}}{p_{избi}^*} \cdot 100 \%$$

Содержание отчёта

1. Протокол эксперимента со схемой установки.
2. Сравнение гидростатического напора во всех точках жидкости.
3. Сопоставление расчётных и измеряемых величин избыточного давления.

4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое гидростатический напор?
2. Геометрическая и энергетическая интерпретация основного уравнения гидростатики.
3. Что такое открытый и закрытый пьезометры?
4. Что такое избыточное и абсолютное давление?

Литература: [1; с. 17, 18].

Лабораторная работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ

Цель работы: установить опытным путём наличие двух режимов течения жидкости.

Описание рабочего участка лабораторной установки

Цикл лабораторных работ (лабораторные работы № 2 – 5) выполняется на универсальном гидравлическом стенде (рис. 2.1), включающем напорное и приёмное устройство, измерительные приборы и рабочий участок. В каждой работе изменяется лишь рабочий участок.

На стойке 4 установлен напорный бак 2, выполненный из нержавеющей стали в виде сферы достаточно большого размера, позволяющий получить стационарный (установившийся) поток жидкости на рабочем участке. Напорный бак имеет выходной патрубок 3, к которому с помощью уплотнения 14 крепится рабочий участок 15 (свой для каждой лабораторной работы). Другой конец рабочего участка закрепляется в патрубке с помощью резиновой манжеты 16, надвигаемой на участок механизмом 17.

В напорную магистраль жидкость (как правило, вода) подаётся насосом 9 при открытом кране 8. Во время эксперимента питающий кран 6 и сливной кран 7 должны быть закрыты. Расход воды через рабочий участок регулируется краном 18 на выходе из рабочего участка и краном 8.

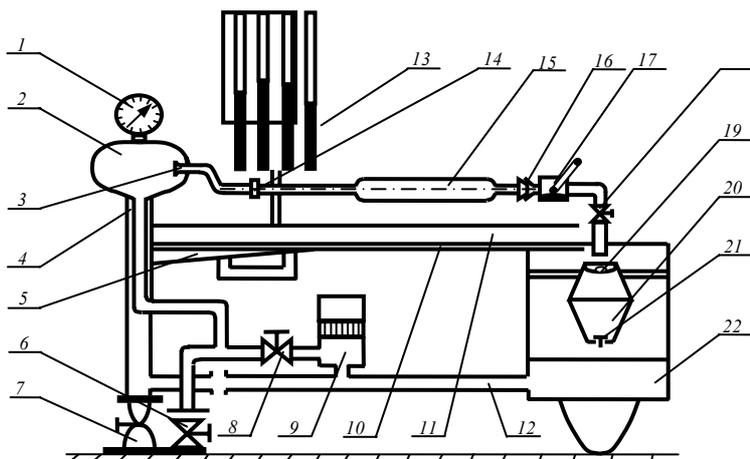


Рис. 2.1. Схема универсального гидравлического стенда

Приёмное устройство представляет собой бак 22, связанный трубопроводом со сливной магистралью 12. Над приёмным баком на консоли 10, левый конец которой укреплен на стойке 4, а правый соединён с баком 22, смонтирован мерный бачок 20 ёмкостью 3,6 л для измерения расхода воды. На консоли установлен лоток 11, который используется для сбора воды и слива её в мерный бачок 20. В днище мерного бачка имеется клапан 21, управляемый с помощью рычажного механизма 19.

При выполнении операции по замеру расхода воды одновременно с закрытием клапана на пульте управления 5 включаются электрические часы. После заполнения водой заданного объёма мерного бачка происходит замыкание контакта выключателя уровня с одновременной остановкой часов.

Измерительные приборы на стенде представлены пьезометрическим щитом 13, на котором смонтировано семь стеклянных трубок длиной 1 м каждая. Избыточное давление в расходном баке измеряется образцовым манометром 1. Для стабилизации режима течения и экономии воды гидравлический стенд работает по замкнутой схеме (краны 6 и 7 при этом закрыты). Регулирование расхода воды при работе производится кранами 8 и 18.

Краны подачи воды из водопровода 6 и слива в канализацию 7 служат для наполнения и слива воды из сливного бака 22 при подготовке лабораторной установки к работе.

Различают два режима течения жидкости в каналах: *ламинарное* (слоистое, когда отдельные струйки не перемешиваются по сечению потока) и *турбулентное* (когда имеются существенные поперечные и продольные пульсации скорости и частицы жидкости перемешиваются из различных слоев).

Экспериментальные исследования показали, что потери энергии в потоке на преодоление сопротивления по длине существенно зависят от режима течения жидкости, поэтому изучение режимов течения и закономерностей, их определяющих, имеет большое значение для практики.

Характеристикой режимов течения служит безразмерное число Рейнольдса. Для напорной трубы круглого сечения оно определяется из выражения

$$Re = \frac{v d}{\nu}, \quad (2.1)$$

где v – средняя скорость потока, м/с; d – диаметр трубы, м; ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

Ламинарный режим течения будет устойчивым для круглых труб при числах Рейнольдса $Re \leq 2320$. При $Re > 2320$ режим течения становится турбулентным.

Работа выполняется на универсальном гидравлическом стенде, где в качестве рабочего участка используется прозрачная (стеклянная) труба 1 постоянного диаметра (рис. 2.2). На входе (сечение 1–1) в центральную часть трубы по тонкой трубке 2 подаётся подкрашенная жидкость, поступающая из бачка 3 при открытии крана 4.

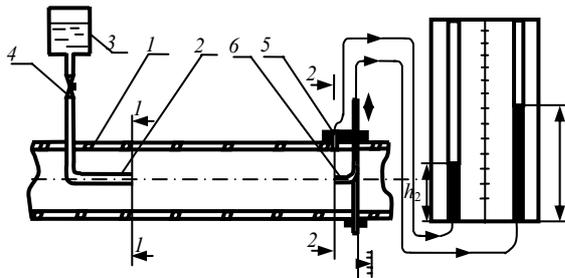


Рис. 2.2. Схема прозрачной трубы

При ламинарном режиме течения окрашенная струйка жидкости (как правило воды) течёт, не смешиваясь с окружающей её средой.

При турбулентном режиме вода окрашивается равномерно.

На выходе из прозрачной трубы установлены датчики статического 5 и полного 6 давлений, соединённые гибкими трубками с пьезометрами. Датчик полного давления (трубка Пито) представляет собой изогнутую под прямым углом трубку, перемещаемую по сечению трубы при помощи микрометрического винта. Для того, чтобы при этом не изменялась площадь поперечного сечения потока, изогнутая трубка 5 перекрывает сечение 2–2 прозрачной трубы по всему диаметру. Расход воды определяется мерным бачком.

Порядок выполнения работы

1. Полностью закрыть краны 6 и 7, включить насос 9 и установить постоянный расход с помощью кранов 8 и 18 (рис. 2.1).
2. Регулируя с помощью крана 18 скорость течения воды и с помощью крана 4 (рис. 2.2) подачу подкрашенной жидкости в прозрачную трубу, установить последовательно ламинарный и турбулентный режимы течения воды в трубе.
3. По показаниям пьезометра h_2 записать величину статического давления в сечении (2–2) для каждого режима (рис. 2.2).
4. По показаниям пьезометра h_{2n} записать величину полного давления в пяти точках по радиусу трубы в сечении (2–2). Измерения производить через 1,5 мм, перемещая трубку датчика полного давления микрометрическим винтом от стенки трубы (рис. 2.2).
5. На каждом режиме течения измерить расход воды, для чего следует по показаниям электрочасов записать время наполнения τ мерного бачка объёмом V литров воды (объём V определяется предварительной тарировкой по моменту открытия клапана 21 в мерном бачке, рис. 2.1).
6. Измерить температуру воды t_b , °С.
7. Данные эксперимента записать в протокол и оформить отчёт о работе.

Протокол эксперимента

Режим	$V, \text{ м}^3$	$\tau, \text{ с}$	Измеряемые величины							
			$h_2 \text{ мм вод. ст.}$	$h_{2n} \text{ мм вод. ст. для точек измерения}$						
				1	2	3	4	5		

Методические указания по обработке опытных данных

1. Статическое давление воды в сечении 2–2 трубы

$$p_2 = p_6 + h_2 \rho_b g 10^{-3},$$

где p_6 – атмосферное давление, Па; h_2 – высота столбика воды в пьезометре для измерения статического давления, мм вод. ст.; ρ_b – плотность воды в пьезометре при рабочей температуре t_b^0 , кг/м³.

2. Полное давление (давление торможения) воды в различных точках по радиусу сечения 2–2 трубы

$$p_2^* = p_0 + h_{2n} \rho_{\text{в}} g \cdot 10^{-3},$$

где h_{2n} – высота столбика воды в пьезометре для измерения полного давления, мм вод. ст.

3. Скорость воды в различных точках по радиусу сечения 2–2 трубы

$$v_i = \sqrt{\frac{2(p_2^* - p_2)}{\rho_{\text{в}}}}, \text{ м/с.}$$

4. Среднеобъёмная скорость потока сечений 2–2 трубы (рис. 2.3)

$$v = \frac{2\Delta r(v_1 r_1 + v_2 r_2 + v_3 r_3 + v_4 r_4) + v_5(r_5 + \frac{\Delta r}{2})^2}{R^2},$$

где r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 – радиусы точек измерения давления торможения в сечении 2–2 трубы, м; Δr – толщина слоя воды, соответствующая данной точке измерения, мм; $\Delta r = 1,5$ мм; R – радиус сечения 2–2 трубы, мм: $R = 8,5$ мм.

Для воды (жидкость практически несжимаема) среднеобъёмная скорость равна среднemasсовой, $v' = v$.

5. Объёмный расход воды

$$Q = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где V – замеренный объём воды, м³; τ – время наполнения объёма V , с.

6. Среднеобъёмная скорость потока в поперечном сечении 2–2 трубы

$$v = \frac{Q}{F}, \text{ м/с},$$

где $F = \pi R^2$, м² – площадь поперечного сечения трубы.

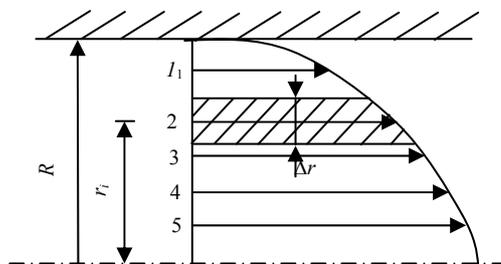


Рис. 2.3. Осреднение скорости по сечению потока

7. Кинематический коэффициент вязкости ν определяется по температуре ($t_{\text{в}}$, °C) воды в соответствии с графикой на рис. 2.3 [1].

8. Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu},$$

где d – диаметр сечения 2–2 трубы, м.

Содержание отчёта

1. Протокол эксперимента со схемой лабораторной установки.
2. Эскизы картины течения при различных числах Рейнольдса (Re).
3. График эпюры скорости воды в сечении 2–2.
4. Сравнение средней скорости v' , полученной осреднением эпюры скорости в сечении 2–2, со скоростью v , полученной по измеренному расходу воды.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Опишите установку Рейнольдса для исследования режимов течения жидкости.
2. В чём отличие ламинарного и турбулентного режимов течения жидкости?
3. Чем вызвано неравномерное распределение скорости жидкости по сечению трубы?
4. Какова зависимость коэффициента кинематической вязкости воды от температуры?

Л и т е р а т у р а : [1, с. 62].

Лабораторная работа 3

ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Цель работы: экспериментальное подтверждение закона сохранения энергии в механической форме (уравнение Бернулли) для потока реальной (вязкой) жидкости.

Описание рабочего участка лабораторной установки

Уравнение Бернулли выражает закон сохранения энергии в механической форме для потока жидкости. Для участка 1–2 элементарной струйки (площадь поперечного сечения бесконечно мала) реальной (вязкой) несжимаемой жидкости (рис. 3.1) при установившемся движении уравнение Бернулли имеет следующий вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma \Delta h_n, \quad (3.1)$$

где zg – удельная потенциальная энергия (энергия положения или иначе, работа сил тяжести); z – геометрическая высота; g – ускорение силы тяжести; $p/\rho g$ – удельная потенциальная энергия давления; $v^2/2g$ – удельная кинетическая энергия; $\Sigma \Delta h_n$ – удельная суммарная потеря энергии на преодоление сопротивлений на участке 1–2.

Таким образом, в уравнении (3.1) энергия удельная, т.е. отнесённая к одному ньютону веса жидкости.

При протекании жидкости в трубе в слагаемое кинетической энергии уравнения (3.1) следует ввести поправочный множитель – коэффициент α , учитывающий неравномерность скорости в поперечном сечении трубы. Тогда для участка 1–2 трубы уравнение Бернулли запишем следующим образом:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \Sigma \Delta h_n. \quad (3.2)$$

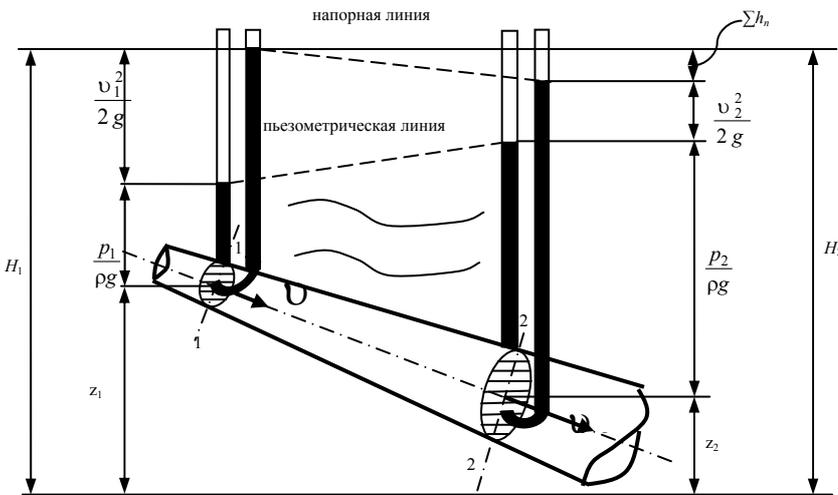


Рис. 3.1. Схема различных напоров на участке элементарной струйки

При ламинарном режиме течения жидкости в трубах $\alpha = 2$, при турбулентном режиме течения $\alpha = 1,05 \dots 1,1$. В практике чаще наблюдается турбулентное течение в трубах, а в инженерных расчётах приближённо принимают $\alpha = 1$.

Из уравнения (3.2) следует, что статическое давление p изменяется не только под влиянием сопротивления $\Sigma \Delta h_n$, но и в результате изменения скорости v_1 , т.е. изменения площади сечения трубы, поскольку $Q = v_1 F_1 = \text{const}$.

Описание лабораторной установки

Рабочий участок гидравлического стенда (см. рис. 2.1) для данной лабораторной работы представляет собой трубу переменного сечения (рис. 3.2). Для измерения статического давления жидкости в трёх сечениях (сечения I, II, III) в стенке трубы имеются отверстия с трубками, соединённые с пьезометрами. Для измерения полного давления на оси трубы в тех же сечениях установлены изогнутые трубки (трубки Пито), соединённые с соответствующими пьезометрами. Таким образом, разница столбиков жидкости ($h_i^* - h_i$) в пьезометре полного давления и в пьезометре статического давления соответствует максимальной скорости на оси трубы.

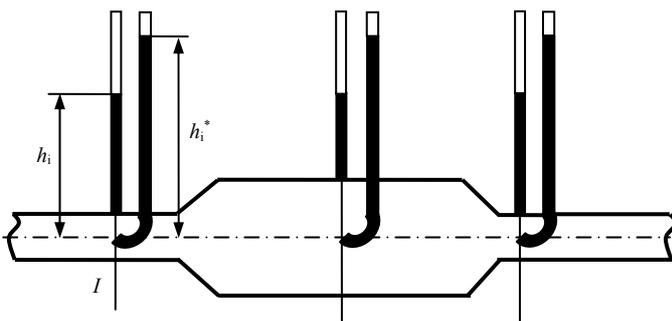


Рис. 3.2. Труба переменного сечения

Порядок выполнения работы

1. При закрытых кранах 6 и 7 включить насос 9, плавно открывая краны 8 и 18; установить постоянный расход через рабочий участок-трубу переменного сечения. При этом наблюдается постоянное показание манометра 1 (рис. 2.1).
2. Записать показания пьезометров статического давления и полного давления в каждом из трёх сечений.
3. Измерить расход воды, для чего по показаниям электрочасов записать время наполнения мерного бачка объёмом V литров.
4. После проведения опытов закрыть краны 18 и 22, прекратив слив и подачу воды в исследуемую трубу, и выключить насос 9.
5. Измерить атмосферное давление p_6 – по барометру.
6. Данные эксперимента записать в протокол.

Протокол эксперимента

Режим	Измеряемые величины							$V, \text{ м}^3$	$\tau, \text{ с}$
	h_1	h_1^*	h_2	h_2^*	h_3	h_3^*			
	мм вод. ст.								

Методические указания по обработке опытных данных

1. Статическое давление воды в сечениях I, II, III трубы

$$p_i = p_6 + \rho_B g h_i 10^{-3}, \text{ Па},$$

где p_6 – атмосферное давление, Па; h_i – высота столбика воды в пьезометре статического давления, мм вод. ст.; ρ_B – плотность воды, кг/м^3 .

2. Давление торможения воды в сечениях I, II, III

$$p_i^* = p_6 + \rho_B g h_i^* 10^{-3}, \text{ Па},$$

где h_i^* – высота столбика воды в пьезометре полного давления, мм вод. ст.

3. Скорость воды по оси трубы в сечениях I, II, III

$$v_{\max} = \sqrt{2 \frac{(p_i^* - p_i)}{\rho_B}}, \text{ м/с}.$$

4. Объёмный расход воды

$$Q = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где V – замеренный объём воды, м^3 ; τ – время наполнения объёма V , с.

5. Среднеобъёмная скорость потока в сечениях I, II, III трубы

$$v_i = \frac{Q}{F_i}, \text{ м/с},$$

где $F_i = \pi R_i^2$ – площадь поперечного сечения трубы, м^2 .

Радиусы поперечных сечений I, II, III трубы:

$$R_1 = R_3 = 7 \text{ мм}; \quad R_2 = 14 \text{ мм}.$$

6. Суммарная потеря энергии на участке трубы сечений I – III

$$(\Sigma \Delta h_n)_{1-3} = \frac{(p_1 - p_3)}{\rho_B g}, \text{ м}.$$

7. Потери энергии на участке трубы сечения I – II

$$(\Sigma \Delta h_n)_{1-2} = \frac{(p_1 - p_2)}{\rho_B g} + \alpha \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}, \text{ м},$$

где $\alpha = 1,05 - 1,1$.

Содержание отчёта

1. Протокол эксперимента со схемой лабораторной установки.
2. Графики изменения p_i, v_i, p_i^* по длине трубы в сечениях I, II, III.
3. Сравнение скорости $v_{\max i}$ – на оси трубы со среднеобъёмной скоростью v_i в сечениях I, II, III трубы.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл уравнения Бернулли?
 2. В чём отличие уравнения Бернулли для потоков идеальной и реальной жидкостей?
 3. Как производится измерение скорости струйки v_{\max} и средней скорости жидкости v в потоке?
 4. Что характеризует коэффициент α ?
 5. Что показывает пьезометрическая линия и линия полной удельной энергии?
 6. Опишите экспериментальную установку для исследования уравнения Бернулли и порядок выполнения работы.
- Л и т е р а т у р а : [1; с. 44].

Лабораторная работа 4

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Цель работы: экспериментальное определение коэффициента сопротивления трения (потерь по длине) и коэффициентов местных гидравлических сопротивлений в потоке вязкой жидкости в трубах.

Описание рабочего участка лабораторной установки

В уравнении Бернулли для потока вязкой жидкости

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma \Delta h_n, \quad (4.1)$$

коэффициенты $\alpha_1 = \alpha_2 \approx 1$.

Слагаемое $\Sigma \Delta h_n$ представляет собой удельную суммарную потерю энергии (потерю части напора) на преодоление гидравлических сопротивлений на участке между сечениями I и II. Гидравлические потери обычно подразделяются на два вида: потери на трение (потери по длине) Δh_l и потери в местных сопротивлениях Δh_m : $\Sigma \Delta h_n = \Delta h_l + \Delta h_m$.

Гидравлические потери в местных сопротивлениях определяются из выражения (формула Дарси-Вейсбаха)

$$\Delta h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (4.2)$$

а гидравлические потери на трение по длине (формула Дарси)

$$\Delta h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}. \quad (4.3)$$

Безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления λ зависит от режима течения жидкости (ламинарного или турбулентного) и выражается через критерий Рейнольдса (Re):

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (4.4)$$

для ламинарного режима течения ($\text{Re} \leq 2320$) и для турбулентного режима течения в зависимости от зоны сопротивления (величины $\text{Re} > 2320$):

– при $2320 < \text{Re} < 56 \frac{d}{\Delta}$ (зона гидравлически гладких труб)

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{\text{Re}}}; \quad (4.5)$$

– при $56 \frac{d}{\Delta} < \text{Re} < 500 \frac{d}{\Delta}$ (зона доквадратичного режима течения)

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

– при $\text{Re} > 500 \frac{d}{\Delta}$ (зона квадратичного режима течения)

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}.$$

Для участка трубы с переменным сечением $\Sigma \Delta h_n$ определяется по бóльшей скорости v , т.е. по мёньшему сечению F . Перепад давления Δp , соответствующий части напора $\Sigma \Delta h_n$, потерянный на преодоление гидравлического сопротивления, определяется по общей формуле

$$\Delta p = \Sigma \Delta h_n \rho g. \quad (4.6)$$

Описание установки

Рабочий участок гидравлического стенда (см. рис. 2.1) для данной лабораторной работы представляет собой трубу переменного сечения, включающую участки с внезапным расширением и сужением, изгибом и дроссельным сопротивлением (рис. 4.1). Чтобы исключить влияние силы тяжести (сократить $z_1 = z_2 = z_3 = \dots = z_n$ в формуле 4.1), ось трубы располагают в

горизонтальной плоскости. На участке 1–2 диаметр трубы – постоянный, на участках 2–3 и 3–4 – внезапное расширение и сужение (соответственно) трубы, участки 4–5 и 5–6 характерны изгибом трубы на угол $\alpha = 90^\circ$ и $\alpha > 90^\circ$, на участке 6–7 имеется дроссельное сопротивление (запорный кран). Участок 1–2 используется для определения потерь на трение, остальные – для определения соответствующих коэффициентов местных сопротивлений.

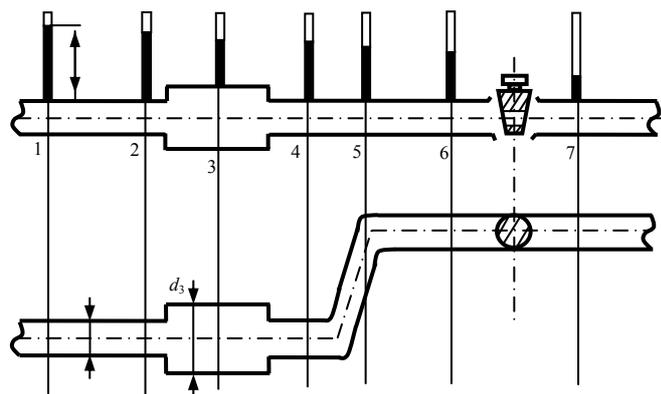


Рис. 4.1. Труба с различными гидравлическими сопротивлениями

Для определения сопротивления $\sum \Delta h_n$ в соответствии с формулой (4.1) на входе и выходе каждого участка измеряется статическое давление посредством трубок – пьезометров, соединённых с приёмными отверстиями в стенке трубы. Средняя скорость потока на входе и выходе каждого участка определяется по измеренному расходу воды и площади сечения трубы. Внутренний диаметр трубы в сечениях 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 одинаков и равен $d_1 = d_2 = d_4 = d_5 = d_6 = d_7 = 14$ мм, диаметр $d_3 = 28$ мм. Длина участка $l_{1-2} = 180$ мм.

Порядок выполнения работы

1. При закрытых кранах 6 и 7 (рис. 2.1), включить насос 9, открыть кран участка 6–7 (рис. 4.1). Плавно открывая краны 8 и 18, достигнуть постоянного расхода в рабочем участке. При этом наблюдается постоянство показаний манометра 1.
2. Записать показания пьезометров статического давления в каждом из семи сечений.
3. Измерить расход воды, для чего по показаниям часов записать время наполнения мерного бачка объёмом V литров (объём определяется предварительной тарировкой).
4. После проведения опытов отключить насос, закрыть краны 8, 18.

Протокол эксперимента

Режим	Измеряемые величины							$V, \text{ м}^3$	$\tau, \text{ с}$
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7		
	мм вод. ст								

Методические указания по обработке опытных данных

1. Объёмный расход воды

$$Q = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где V – замеренный объём воды, м^3 ; τ – время наполнения объёма, с.

2. Скорость воды в трубопроводе

$$v_i = \frac{Q}{F_i}, \text{ м/с},$$

где $F_i = \frac{\pi d_i^2}{4}$ – площадь поперечного сечения трубы, м^2 .

Радиусы поперечных сечений 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 трубы

$$R_1 = R_2 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = 7 \text{ мм}; R_3 = 14 \text{ мм}.$$

3. Потери на трение по длине на участке 1–2

$$\Delta h_{1-2} = \frac{(p_1 - p_2)}{\rho g} = (h_1 - h_2), \text{ м},$$

где $(h_1 - h_2)$ – разница уровней в пьезометрах на входе и выходе участка 1–2, м; ρ – плотность воды, кг/м^3 .

4. Местные потери на участке 2–3 (внезапное расширение)

$$\Delta h_{m_{2-3}} = \frac{(p_2 - p_3)}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_3^2}{2g} = (h_2 - h_3) + \frac{v_2^2 - v_3^2}{2g}, \text{ м.}$$

5. Местные потери на участке 3–4 (внезапное сужение)

$$\Delta h_{m_{3-4}} = \frac{(p_3 - p_4)}{\rho g} + \frac{v_3^2 - v_4^2}{2g} = (h_3 - h_4) + \frac{v_3^2 - v_4^2}{2g}, \text{ м.}$$

6. Местные потери на участке 4–5 (изгиб $\alpha = 90^\circ$)

$$\Delta h_{m_{4-5}} = \frac{(p_4 - p_5)}{\rho g} = (h_4 - h_5), \text{ м.}$$

7. Местные потери на участке 5–6 (изгиб $\alpha > 90^\circ$)

$$\Delta h_{m_{5-6}} = \frac{(p_5 - p_6)}{\rho g} = (h_5 - h_6), \text{ м.}$$

8. Местные потери на участке 6–7 (кран)

$$\Delta h_{m_{6-7}} = \frac{(p_6 - p_7)}{\rho g} = (h_6 - h_7), \text{ м.}$$

9. Коэффициент сопротивления трения (из формулы (4.3))

$$\lambda = \Delta h_{l_{1-2}} d_1 \frac{2g}{l_{1-2}} v_1^2,$$

где $d_1 = 0,014$ м; $l_{1-2} = 0,18$ м.

10. Коэффициент местных сопротивлений (из формулы (4.2))

$$\zeta_{2-3} = \Delta h_{m_{2-3}} \frac{2g}{v_2^2}.$$

11. Число Рейнольдса на участке 1–2

$$Re = v_1 \frac{d_1}{\nu}.$$

12. Коэффициент гидравлического сопротивления трения (расчётный)

$$\lambda_p = \begin{cases} \frac{64}{Re} & \text{при } Re \leq 2320; \\ \frac{0,316}{Re^{0,25}} & \text{при } 2320 < Re < 56 \frac{d}{\Delta}; \\ 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25} & \text{при } 56 \frac{d}{\Delta} < Re < 500 \frac{d}{\Delta}; \\ 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25} & \text{при } Re > 500 \frac{d}{\Delta}. \end{cases}$$

Содержание отчёта

1. Протокол эксперимента со схемой установки.
2. Сравнения λ с λ_p .
3. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое гидравлические потери и каких видов они бывают?
 2. Как определяются коэффициент местного сопротивления ζ и коэффициент гидравлического сопротивления на трение по длине λ ?
 3. Опишите схему лабораторной установки и порядок выполнения работы.
- Л и т е р а т у р а : [1; с. 93], [3, с. 139].

Лабораторная работа 5

ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ

Цель работы: определение опытным путём числовых значений коэффициентов расхода μ , скорости ϕ , сжатия струи ϵ , сопротивлений ζ при истечении воды через малое отверстие в тонкой стенке и различные насадки.

Описание рабочего участка лабораторной установки

Истечение жидкости из резервуаров, баков через отверстия и насадки (короткие патрубки разной формы) в атмосферу или в пространство, заполненное газом или той же жидкостью, характеризуется преобразованием запаса потенциальной

энергии жидкости в резервуаре с большими или меньшими потерями в кинетическую энергию струи. Часть энергии необратимо расходуется на преодоление сопротивления кромок отверстия или насадка. Основной задачей является определение скорости истечения и расхода жидкости.

Отверстие считается малым, если его высота (диаметр d_0) значительно меньше, чем располагаемый напор H , ($d_0 < 0,1H$). Под термином "тонкая стенка" следует понимать такую толщину стенки, при которой жидкость, протекая через отверстие, не касается его поверхности. Отверстие может быть выполнено в толстой стенке, но с заострением входной кромки с внешней стороны (рис. 5.1). При истечении, вследствие перехода от различных направлений движения жидкости в резервуаре к осевому движению, происходит сжатие струи. Сжатое сечение 2-2 (рис. 5.1) образуется на расстоянии $(0,5 - 1,0)d_0$ от стенки резервуара. Сжатие струи оценивается степенью сжатия

$$\varepsilon = \frac{F_2}{F_0}, \quad (5.1)$$

где F_2 – площадь сжатого сечения струи; F_0 – площадь отверстия.

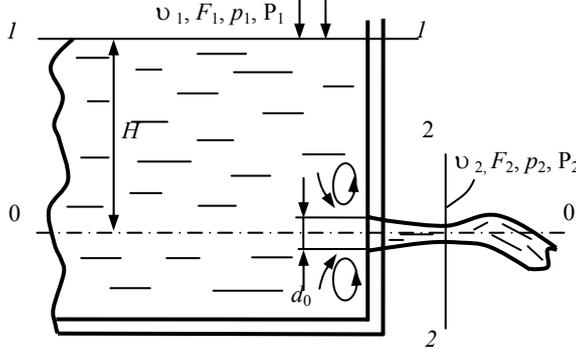


Рис. 5.1. Истечение жидкости через отверстие в тонкой стенке

Для круглого отверстия

$$\varepsilon = \left(\frac{d_2}{d_0} \right)^2, \quad (5.2)$$

где d_2 – диаметр сжатого сечения струи жидкости; d_0 – диаметр отверстия.

Рассмотрим случай истечения жидкости через малое отверстие в тонкой стенке, когда давление над жидкостью p_1 и на выходе из отверстия p_2 равны давлению окружающей среды p_6 , т.е. $p_1 = p_2 = p_6$. Кроме того, скорость движения жидкости в резервуаре v_1 , ввиду её малости по сравнению со скоростью истечения из отверстия v_2 , принимаем равной нулю, т.е. $v_1 = 0$. Из уравнения Бернулли, составленного для сечения 1-1 потока жидкости в резервуаре и 2-2 струи (рис. 5.1)

$$z_1 + \frac{h_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{h_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \sum \Delta h_n. \quad (5.3)$$

Выражая потери энергии $\sum \Delta h_n$ по формуле

$$\sum \Delta h_n = \Delta h_m = \zeta \frac{v_2^2}{2g}, \quad (5.4)$$

после преобразования получим

$$v_2 = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (5.5)$$

где $\varphi = 1/\sqrt{\alpha_2 + \zeta}$ – коэффициент скорости отверстия; $H = (z_1 - z_2)$ – напор истечения.

При истечении идеальной жидкости коэффициент местного сопротивления $\zeta = 0$, коэффициент скорости $\varphi = 1$, теоретическая скорость истечения

$$v_{2\text{ид}} = \sqrt{2gH}. \quad (5.6)$$

Из формулы (6.5) следует, что коэффициент скорости отверстия есть отношение действительной скорости истечения жидкости к теоретической:

$$\varphi = \frac{v_2}{v_{2\text{ид}}}. \quad (5.7)$$

Действительная скорость истечения v_2 вследствие гидравлического сопротивления всегда несколько меньше теоретической скорости. Поэтому коэффициент скорости φ всегда меньше единицы.

Объёмный расход жидкости $Q = v_2 \cdot F_2$.

Используя уравнения (5.1) и (5.5), получим расчётную формулу объёмного расхода:

$$Q = \mu F_0 \sqrt{2gH}, \quad (5.8)$$

где $\mu = \epsilon\varphi$ – коэффициент расхода отверстия.

Для идеальной жидкости без сжатия струи

$$Q = F_0 \sqrt{2gH}. \quad (5.9)$$

Из уравнения (5.8) и (5.9) следует, что коэффициент расхода

$$\mu = \frac{Q}{Q_{ид}} \quad (5.10)$$

всегда меньше единицы вследствие влияния двух факторов: сжатия струи и гидравлического сопротивления. Величины коэффициентов φ , ϵ , μ зависят от формы отверстия, отношения площадей F_0/F_1 (F_1 – площадь сечения резервуара) и от числа Рейнольдса.

Короткие трубки длиной l , равной $(3-4)d_0$, присоединённые к отверстию в тонкой стенке (рис. 5.2), называют *насадками*.

Насадки делятся на три основных типа: цилиндрические, конические, коноидальные. Цилиндрические насадки бывают внешние и внутренние, конические – сходящиеся и расходящиеся (диффузоры), коноидальные – комбинированные. При движении жидкости в цилиндрической насадке (рис. 5.2) струя сначала сжимается примерно так же, как и при истечении из отверстия в тонкой стенке, а затем расширяется и заполняет все сечения насадка. Зона между струей и внутренней поверхностью насадка в области минимального сечения струи характеризуется пониженным, в сравнении с окружающим, давлением p_6 и вихревым движением жидкости. При одинаковых площади F_0 и напоре H расход через насадок будет больше, чем расход через отверстие. Увеличение расхода жидкости Q через насадок объясняется увеличением скорости в сжатом сечении вследствие наличия зоны пониженного давления.

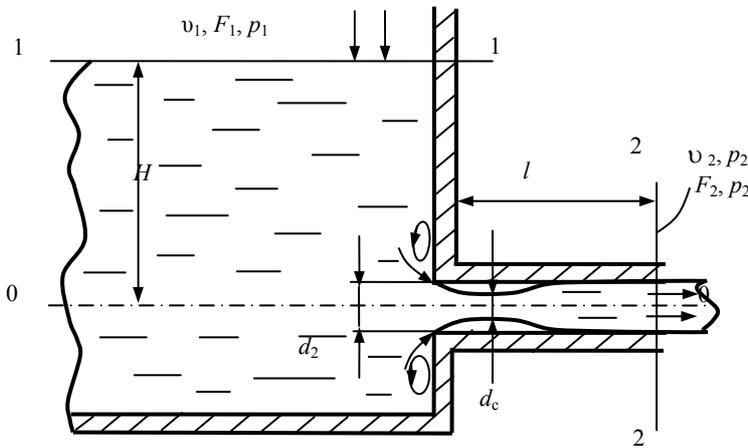


Рис. 5.2. Истечение жидкости из внешнего цилиндрического насадка

Формула скорости и расхода для насадков те же, что и для отверстия в тонкой стенке, но при этом коэффициенты φ , ϵ , μ имеют другие значения.

При экспериментальном определении коэффициентов φ , ϵ , μ , кроме заданных H и Q , необходимо знать либо величину скорости v_2 , либо площадь струи F_2 . Легче определить скорость по измеренным коэффициентам x , y на оси струи произвольного сечения (рис. 5.3). При свободном истечении струи её траектория имеет форму параболы. Пренебрегая трением струи о воздух, можно предположить, что каждая частица струи жидкости движется как свободная материальная точка, на которую действует только сила тяжести. Тогда движение жидкости после истечения из отверстия (насадка) рассматривается

как сумма равноускоренного движения по вертикали ($y = g \frac{\tau^2}{2}$) и равномерного движения по горизонтали ($x = v_2 \tau$, где

$v_2 = \varphi \sqrt{2gH}$). Исключив время τ , получим

$$v_2 = x \sqrt{\frac{g}{2y}}. \quad (5.11)$$

Из-за перекоса насадка при истечении возможно некоторое отклонение оси струи жидкости от горизонтального направления. С учётом этого отклонения более точный расчёт скорости истечения производится с помощью координат x_1, y_1 и x_2, y_2 , измеренных в двух сечениях струи

$$v_2 = \sqrt{\frac{g(x_2 - x_1)^2}{2(y_2 - y_1)}}. \quad (5.12)$$

Описание установки

Рабочий участок представляет собой набор сменных насадков, присоединяемых с помощью накидной гайки 14 (рис 2.1) к универсальному гидравлическому стенду.

Координирование траектории оси струи производится вертикальной линейкой 1, перемещающейся по горизонтальной линейке 2 (рис. 5.3).

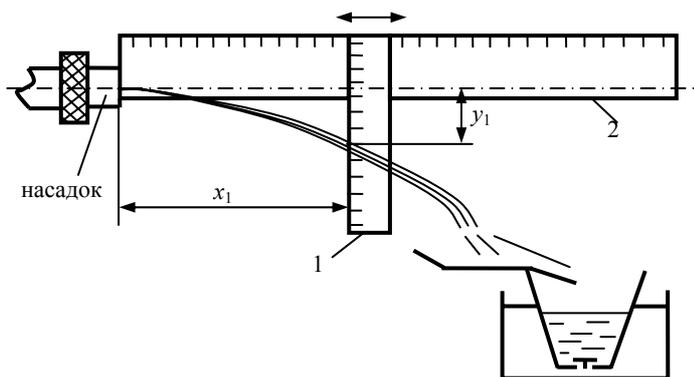


Рис. 5.3. Схема рабочего участка

Набор насадок представлен на рис. 5.4. Насадок 1 соответствует отверстию в тонкой стенке. Струя накрывается защитным колпаком.

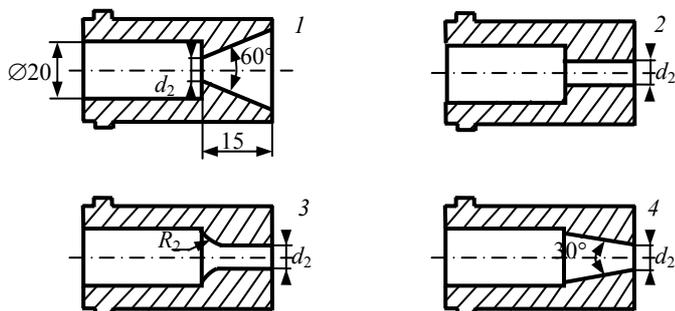


Рис. 5.4. Набор исследуемых насадок:

1 – отверстие в тонкой стенке; 2 – цилиндрический внешний; 3 – коноидальный;

4 – конический сужающийся

Порядок выполнения работы

1. При закрытых кранах 7 и 6 включить насос 9 и, открывая вентиль 8, добиться постоянства расхода при установившемся показании манометра 1.

2. На расстояниях $x_1 = 330$ мм, $x_2 = 800$ мм от входного отверстия насадка измерить вертикальные координаты оси струи y_1 и y_2 .

3. Определить расход воды, для чего закрыть клапан 21, с помощью секундомера определить время τ наполнения мерного бачка 20 водой объёмом V литров и записать показания манометра p_m .

4. После замера расхода открыть клапан 21 для слива воды из мерного бачка.

5. Данные эксперимента записать в протокол.

6. Сменить насадок и повторить опыт (пункты 2 – 5).

Протокол эксперимента

№ насадка	Измеряемые величины						
	$V, \text{ м}^3$	$\tau, \text{ с}$	$p_m, \text{ Па}$	d_2	x_1	y_1	x_2
				мм			

Методические указания по обработке опытных данных

1. Теоретическая скорость истечения

$$v_{2\text{ид}} = \sqrt{2 \frac{p_m}{\rho}}, \text{ м/с,}$$

где ρ – плотность воды.

2. Действительная скорость истечения

$$v_2 = \sqrt{\frac{g}{2} \frac{x_2 x_1 (x_2 - x_1)}{x_1 y_2 - x_2 y_1}}, \text{ м/с,}$$

где x, y – координаты оси струи, м.

3. Коэффициент скорости

$$\varphi = \frac{v_2}{v_{2ид}}$$

4. Коэффициент гидравлического сопротивления отверстия (насадка)

$$\zeta = \frac{1}{(\varphi^2 - 1)}$$

5. Теоретический объёмный расход воды

$$Q_{ид} = F_0 \sqrt{2 \frac{P_M}{\rho}}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где F_0 – площадь выходного сечения отверстия (насадка), м^2 .

6. Действительный объёмный расход воды

$$Q = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где V – замеренный объём жидкости, м^3 ; τ – время наполнения этого объёма, с.

7. Коэффициент расхода $\mu = \frac{Q}{Q_{ид}}$.

8. Степень сжатия струи $\varepsilon = \frac{\mu}{\varphi}$.

Содержание отчёта

1. Протокол эксперимента со схемой установки
2. Сравнение величин коэффициентов $\varphi, \varepsilon, \mu, \zeta$ для различных насадков и отверстия.
3. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое гидравлический насадок?
 2. Назначение гидравлического насадка.
 3. Что такое степень сжатия струи, его физический смысл?
 4. В чём отличие коэффициентов расхода в различных насадках?
- Л и т е р а т у р а : [1, с. 106 – 117].

Лабораторная работа 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И РАСХОДА ЖИДКОСТИ

Цель работы: изучить гидравлические основы работы устройства (диафрагмы) для измерения расхода и скорости жидкости в трубопроводах и методы её тарировки; определить для диафрагмы коэффициент расхода.

Описание рабочего участка лабораторной установки

Для измерения расхода жидкости в трубопроводах часто используется сужающиеся устройства (например: диафрагма, сопло, труба Вентури). Диафрагма представляет собой тонкий диск с концентрическим отверстием диаметром d , имеющий острую кромку со стороны входа жидкости (рис. 6.1). При протекании через сужающееся устройство изменяется площадь проходного сечения струи жидкости, а соответственно – скорость движения и статическое давление.

Обозначим сечение 1–1 трубопровода перед входом в диафрагму в том месте, где это устройство ещё не влияет на характер потока, а 2–2 – сечение наибольшего сжатия струи после диафрагмы. На рис. 6.1 показано также изменение статического давления и средней скорости при движении жидкости через диафрагму.

Зависимость между расходом несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$) и перепадам статического давления (разностью пьезометрических напоров) в выбранных сечениях 1–1 и 2–2 может быть определена с помощью уравнения Бернулли и уравнения расхода для установившегося движения.

Введём обозначения:

- z_1 и z_2 – высота центра тяжести сечений 1–1 и 2–2 над плоскостью сравнения;
- F_1 – площадь сечения трубопровода;
- F_d – площадь проходного сечения диафрагмы;
- F_2 – площадь сечения потока жидкости в месте наибольшего сжатия;
- α_1 и α_2 – значения коэффициента кинетической энергии потока соответственно в сечениях 1–1 и 2–2;
- $\zeta_{1,2}$ – коэффициент местного сопротивления на участке потока между сечениями 1–1 и 2–2.

Уравнение Бернулли

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \sum \zeta_i \frac{v_2^2}{2g}. \quad (6.1)$$

Уравнение расхода

$$F_1 v_1 = F_2 v_2 = Q = \text{const}. \quad (6.2)$$

В уравнении (6.2) площадь сечения струи F_2 можно определить по площади отверстия сужающегося устройства (диафрагмы), используя коэффициент сжатия струи ε :

$$F_2 = \varepsilon F_d, \quad (6.3)$$

тогда $F_1 v_1 = \varepsilon F_d v_2$ и $v_1 = v_2 \varepsilon \frac{F_d}{F_1}$. (6.4)

Из уравнения (6.1) с учётом (6.4) получим

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 - \alpha_1 \varepsilon^2 \left(\frac{F_d}{F_1}\right)^2 + \sum \zeta_{1,2}}} \sqrt{2g \left[(z_1 - z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho g} \right]}. \quad (6.5)$$

Объёмный расход жидкости $Q = v_2 F_2$.

С учётом (6.3) и (6.5) уравнение (6.6) приобретает вид

$$Q = \frac{\varepsilon}{\sqrt{\alpha_2 - \alpha_1 \varepsilon^2 \left(\frac{F_d}{F_1}\right)^2 + \sum \zeta_{1,2}}} F_d \sqrt{2g \left[(z_1 - z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho g} \right]}. \quad (6.7)$$

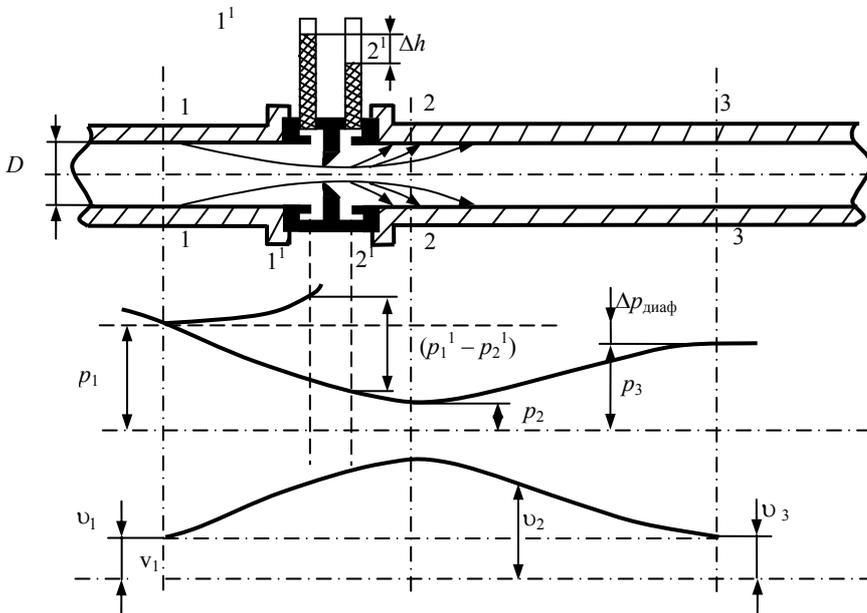


Рис. 6.1. Структура потока. Распределение давления p и средней скорости v в трубе с диафрагмой

В уравнении (6.7) $p_1 - p_2 = \Delta p$ – разность давлений в точках, соответствующих средним скоростям в сечениях 1–1 и 2–2. Обычно замер давлений производится в непосредственной близости до и после прибора у стенок трубопровода или в кольцевых камерах сечений (1–1 и 2–2), сообщающихся с потоком при помощи кольцевых щелей (рис. 6.1). Эти камеры осредняют давление по периметру сечения трубы. Обозначим отношение перепада давлений в выбранных сечениях к измеренному через коэффициент $\psi = \frac{p_1' - p_2'}{p_1 - p_2}$, который зависит только от конструктивных особенностей устройства. Тогда уравнение (6.7) можно представить в виде

$$Q = \mu F_d \sqrt{2g \left[(z_1 - z_2) + \frac{(p_1' - p_2')}{\rho g} \right]}, \quad (6.8)$$

где
$$\mu = \frac{\varepsilon \sqrt{\psi}}{\sqrt{\alpha_2 - \alpha_1 \varepsilon^2 \left(\frac{F_d}{F_1}\right)^2 + \sum \zeta_{1,2}}}. \quad (6.9)$$

Множитель μ в уравнении (6.8) называется коэффициентом расхода сужающегося устройства (диафрагмы).

Отношение $F_d/F_1 = (d/D)^2$ согласно ГОСТ 18083–72 называют относительной площадью сужающегося устройства и обозначают буквой m :

$$m = \frac{F_d}{F_1} = \left(\frac{d}{D}\right)^2. \quad (6.10)$$

Уравнение (6.9) с учётом (6.10):

$$\mu = \frac{\varepsilon\sqrt{\Psi}}{\sqrt{\alpha_2 - \alpha_1\varepsilon^2 m^2 + \Sigma\zeta_{1,2}}}. \quad (6.11)$$

В случае движения жидкости по горизонтальной трубе ($z_1 = z_2$) уравнение (6.8) упрощается до вида

$$Q = \mu F_d \sqrt{2g\Delta h}, \quad (6.12)$$

где $\Delta h = \frac{p'_1 - p'_2}{\rho g}$ – разность пьезометрических напоров. Расчёт по формуле (6.9) является приближенным из-за невозможности точного определения коэффициентов.

С достаточной точностью (для практических расчётов) значение коэффициента μ для каждого расходомера может быть определено опытным путём. Для этого, используя иной способ измерения расхода жидкости, например объёмный, определяют μ по формуле (6.12)

$$\mu = \frac{Q}{F_d \sqrt{2g\Delta h}}. \quad (6.13)$$

Получив опытные значения μ при различных значениях расхода жидкости (а значит и различных числах Рейнольдса) можно построить тарировочный график $\mu = f(Re)$ для данного расходомерного устройства с постоянным значением m .

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для тарирования диафрагмы (рис. 6.2) состоит из трубопровода 1, напорного бака 2, в котором поддерживается постоянный уровень (напор) и мерного бака 7. На трубопроводе установлены регулирующие вентили 3 и 4, диафрагма 5, перекидное устройство 6.

Перепады статических напоров замеряются с помощью пьезометрических трубок.

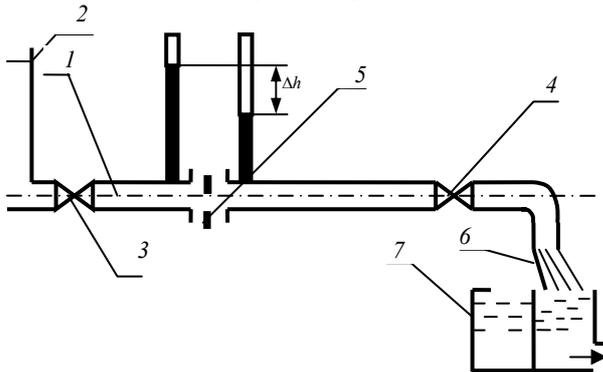


Рис. 6.2. Схема рабочего участка установки для тарировки диафрагмы

Порядок выполнения работы

1. Максимально открыть вентиль 3.
 2. С помощью вентилей 4 установить определенный расход.
 3. Измерить расход, для чего перекидным устройством направить воду в мерный отсек, одновременно включить секундомер. Записать показание τ секундомера и объём в мерном баке V .
 4. Записать показания пьезометров h_1 и h_2 , а также температуру воды t_b .
- Опыты повторить для семи различных значений расхода.

Протокол эксперимента

Режим	Экспериментальные данные												
	h_1	h_2	Δh	τ , с	t_b , °C	D , м	d , м	F , м ²	F_d , м ²	Re	Q , м ³ /с	μ	V , м ³
	мм вод. ст.												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Методические указания по обработке опытных данных

1. Объёмный расход воды

$$Q = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где V – замеренный объём воды, м³; τ – время заполнения замеренного объёма воды, с.

2. Среднемассовая скорость воды в трубопроводе

$$v = \frac{Q}{F}, \text{ м/с,}$$

где $F_1 = F$ – площадь поперечного сечения трубы, м^2 .

3. Разность пьезометрических напоров в сечениях до и после диафрагмы

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \frac{p'_1 - p'_2}{\rho g}, \text{ м}$$

4. Коэффициент расхода диафрагмы

$$\mu = \frac{Q}{F_d} \sqrt{2g\Delta h},$$

где F_d – площадь проходного сечения диафрагмы, м^2 .

5. Кинематический коэффициент вязкости ν определяется по температуре воды t_b , $^{\circ}\text{C}$.

6. Число Рейнольдса $Re = v \frac{d}{\nu}$,

где d – диаметр трубы, м ; v – среднemasовая скорость потока воды в трубе, м/с ; ν – кинематический коэффициент вязкости воды, $\text{м}^2/\text{с}$.

7. На основании полученных данных построить график зависимости

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

8. По графику найти нижнюю границу квадратичной зоны $\mu = \text{const}$ и определить среднеарифметическое нескольких значений $\mu_{\text{ср}}$:

$$\mu_{\text{ср}} = \frac{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n}{n}.$$

Содержание отчёта

1. Протокол эксперимента со схемой установки.
2. График зависимости коэффициента расхода диафрагмы от числа Рейнольдса, $\mu = f(Re)$.
3. Определение по графику $\mu = f(Re)$ нижней границы квадратичной зоны $\mu = \text{const}$.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. На каком принципе основано измерение расхода по перепаду статических напоров?
 2. Как производится тарировка диафрагмы?
 3. Опишите схему лабораторной установки и порядок выполнения работы.
- Литература : [1, с. 52].

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы / под редакцией Т.М. Башта. – М. : Машиностроение, 1982. – 424 с.
2. Башта, Т.М. Машиностроительная гидравлика : справочное пособие / Т.М. Башта. – М. : Машиностроение, 1974. – 672 с.
3. Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидropередач / под. ред. С.С. Руднева и Л.Г. Подвидза. – М. : Машиностроение, 1974. – 416 с.