

Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.»

Кафедра «Технология и оборудование химических, нефтегазовых
и пищевых производств»

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Методические указания к лабораторным работам
для студентов направлений

15.03.02 «Технологические машины и оборудование»

21.03.01 «Нефтегазовое дело»

всех форм обучения

Энгельс 2024

Лабораторная работа №1

Определение режимов потока жидкости

Цель работы: экспериментально изучить физические явления поперечного переноса при течении жидкости в трубах, а также методы теоретического анализа режимов течения.

Теоретические основы

Исследованиями установлено, что для реальных (вязких) жидкостей существуют два резко различного вида движения - ламинарное (слоистое) и турбулентное (вихревое).

Ламинарным называется такой режим, при котором поток движется отдельными струйками и траектории частиц жидкости между собой не пересекаются, а турбулентным - когда струйчатость потока нарушается, и частицы жидкости совершают хаотичное движение.

Этот факт впервые был установлен в 1880 г. профессором Д.И. Менделеевым (1834-1907) и был экспериментально подтвержден опытами английского физика О. Рейнольдса (1842-1912).

Характер движения, как показали опыты, зависит от скорости движения, вязкости, плотности жидкости и геометрических размеров потока.

Влияние перечисленных параметров потока на характер движения определяется величиной безразмерного комплекса, называемого критерием Рейнольдса

$$Re = \frac{w \phi}{\mu},$$

где w – скорость потока, м/с;

d – диаметр трубопровода, м;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

μ – динамический коэффициент вязкости, Н·с/м².

Опыты с различными жидкостями показали, что смена режимов движения происходит при определенном значении числа Рейнольдса, называемого критическим $Re_{кр}$.

Скорость, при которой происходит переход от одного режима к другому, называется критической.

При постепенном ускорении движение сохраняется ламинарным только до определенной скорости – «верхней критической», - после которой наступает турбулентный режим. При проведении опытов в обратном порядке турбулентный режим сохраняется до скорости, называемой «нижней критической», и переходит в ламинарный

$$w_{крн} < w_{крв}$$

«Нижней» и «верхней» критическим скоростям соответствуют «нижний» и «верхний» критерии Рейнольдса. Для прямых и гладких труб гладкого

сечения

$$Re_{кр} = 2320$$

$$Re_{кр} = 10000$$

Следовательно, при значениях $Re < 2320$ возможен только ламинарный режим движения, а если $Re > 10000$ – турбулентный.

В области, для которой $2320 < Re < 10000$, возможны оба режима – турбулентный и ламинарный. Эта область является неустойчивой и называется «переходной». Характер движения рассматриваемого потока имеет решающее значение в расчетах, связанных с движением жидкости или газа.

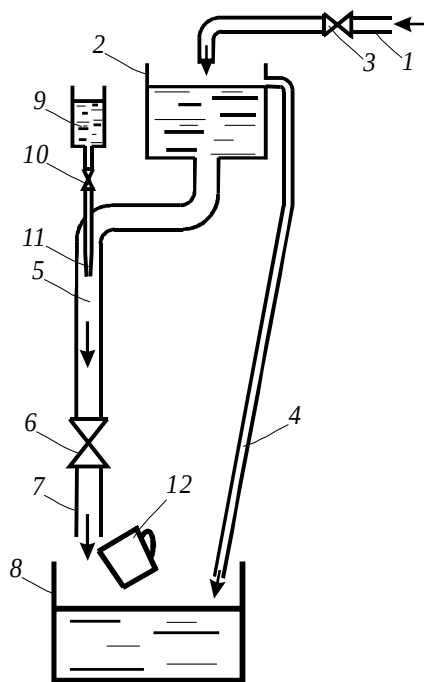


Рис. 1. Схема лабораторной установки для определения режимов движения потока:
1-водопровод; 2-напорный бак; 3-кран; 4-сливная труба; 5-стеклянная труба; 6, 10-запорно-регулирующие краны; 7-штуцер; 8-приемный бак; 9-сосуд с раствором краски; 11-тонкая трубка для выпуска раствора краски; 12-мерная емкость

Описание лабораторной установки

Схема установки приведена на рис. 1. Из городского водопровода 1 подают воду в напорный бак 2, регулируя подачу краном 3. Для предупреждения переполнения бака и поддержания в нем постоянного уровня воды установлена переливная труба 4. Во время работы установки вода из напорного бака 2 поступает в стеклянную трубку 5, снабженную запорно-регулирующим краном 6 и штуцером 7 для выпуска воды в приемный бак 8.

Одновременно из сосуда 9 через запорно-регулирующий кран 10 и, установленную по оси стеклянной трубы 5, тонкую трубку 11 подается окрашенный раствор.

Расход воды через стеклянную трубу 5 определяется с помощью мерной емкости 12.

Порядок выполнения работы

Перед началом работы необходимо проверить наличие воды в баке 2. Если ее недостаточно, открывается вентиль 3 и бак заполняется водой. Во время проведения работы уровень воды в баке 2 поддерживается постоянным. Это обеспечивается путем непрерывного удаления избытка воды через сливную трубу 4 в приемный бак 8.

Затем открывается вентиль 6 и устанавливается небольшой расход воды в трубе 5. Открытием вентиля 10 регулируется поступление окрашенной жидкости таким образом, чтобы она вытекала в трубку в виде тонкой струйки. Изменением расхода воды в трубке устанавливаются последовательно ламинарный, переходный, турбулентный режимы движения жидкости.

При каждом режиме замеряется расход воды. Для этого под штуцер 7

подставляется мерная емкость и по секундомеру замечается время заполнения емкости. Температура воды измеряется жидкостным термометром в приемном баке 8.

После проведения всех измерений производится обработка полученных результатов.

1. Определяется скорость движения воды в стеклянной трубе

$$w = \frac{V}{0,815 \cdot \tau} \text{ м/с},$$

где V - количество воды, поступившей в мерную емкость, м^3 ;

d - диаметр стеклянной трубы, равен $0,013 \text{ м}$,

τ - время заполнения мерной емкости, с .

2. Значения критерия Рейнольдса определяются по формуле

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d}{\mu}.$$

Результаты наблюдений, опытные и расчетные данные заносятся в таблицу.

Таблица 1.

Обработка опытных данных

№ опыта	Время заполнения мерной емкости τ , с	Объем поступившей воды V , м^3	Температура воды t , $^{\circ}\text{C}$	Динам. коэфф. вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$	Скорость движения воды w , м/с	Re	Вид подкрашенной струйки	Режим потока
1								
2								
3								
...								

Значения ρ и μ в зависимости от температуры берутся из [3]

При увеличении скорости течения жидкости по трубе наблюдаются следующие изменения окрашенной струйки:

а) при малых скоростях течения воды окрашенная струйка не размывается, имея вид натянутой нити (ламинарный режим);

б) при увеличении скорости окрашенная струйка приобретает волнистые очертания, наблюдаются отдельные мелкие струи красителя (переходная область);

в) при достаточно большой скорости движения струйки краски полностью размываются, окраска жидкости монотонная (турбулентный режим). Устойчивый режим движения устанавливается на расстоянии $l=40d$ трубы от ввода жидкости.

Контрольные вопросы

1. Определение режимов движения потока.
2. Что называется критической скоростью?
3. Критерий Re и его физический смысл.
4. Критическое значение критерия Re .
5. График распределения скоростей по сечению трубопровода при различных режимах.
6. Определение эквивалентного диаметра.
7. Понятие мгновенной и средней скорости.
8. Уравнение расхода.
9. Размерность ρ и μ в различных системах.
10. Структура потока (ядро, пограничный слой).

Лабораторная работа №2

Исследование коэффициента гидравлического трения

Цель работы: опытное определение коэффициентов гидравлического трения λ в круглой трубе при различных скоростях жидкости; построение графиков зависимости $\lambda=f(Re)$ по опытным и расчетным данным.

Теоретические основы

При проектировании технологических установок необходимо знать гидравлические сопротивления прохождению потоков по коммуникациям и через отдельные аппараты. Расчет гидравлических сопротивлений определяет выбор давления, необходимого для транспортирования жидкостей и газов, а, следовательно, и выбор насосов, компрессоров и вентиляторов.

На преодоление гидравлического сопротивления расходуется часть или весь напор движущейся жидкости. Одна из составляющих потери напора h_{mp} (или давления $\Delta P_{mp} = \rho g h_{mp}$) определяется в инженерных расчетах по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h_{mp} = \lambda \frac{w^2 l}{2gd}, \quad (1)$$

где l – длина трубы; $d_e = \frac{4f}{\Pi}$ – эквивалентный диаметр; w – средняя скорость; λ – коэффициент гидравлического трения; g – ускорение свободного падения.

Данная составляющая обусловлена наличием трения потока о стенки канала и вязкости жидкости. Для ее расчета необходимо располагать значениями коэффициента гидравлического трения λ .

Если течение жидкости в прямом канале ламинарное ($Re \leq 2300$), то коэффициент гидравлического трения может быть рассчитан по теоретической формуле

$$\lambda = \frac{A}{Re}, \quad (2)$$

где $Re = \frac{w d_e}{\nu}$ – число Рейнольдса; $d_e = 4f/\Pi$ – эквивалентный диаметр канала; μ и ν – динамический и кинематический коэффициенты вязкости; A – коэффициент зависящий от формы поперечного сечения канала, для круглых труб $A=64$, для труб квадратного сечения $A=57$, для сечения – равносторонний треугольник $A=53$.

При турбулентном режиме течения дополнительное влияние на гидравлическое сопротивление начинают оказывать шероховатость поверхности стенок канала и турбулентная вязкость потока. Коэффициент гидравлического трения здесь рассчитывают по эмпирическим формулам, полученным в результате обработки опытных данных. Известно много формул, в той или иной степени согласующихся между собой. Удобна для использования в инженерных расчетах формула Альтшуля

$$\lambda = 0,1 \left(\frac{68\Delta}{Re} \right)^{0,25}, \quad (3)$$

где Δ - средняя высота бугорков шероховатости на стенке.

В технических условиях средняя высота выступов шероховатости Δ равна для цельнотянутых стальных труб - $0,02 \div 0,1$ мм, для бывших в употреблении, незначительно коррозированных - $0,1 \div 0,4$ мм.

Формула Альтшуля, как и всякая другая эмпирическая формула, имеет ограничения по изменению влияющих параметров. Она справедлива для интервала чисел Рейнольдса $Re = 410 \div 10^6$. При $Re \frac{\Delta}{d_s} < 10$ (режим гидравлически гладких стенок) формула Альтшуля становится одночленной

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}. \quad (4)$$

Если $Re \frac{\Delta}{d_s} > 50$ (режим развитой шероховатости стенок), то в формуле (3) малой величиной становится член $\frac{68}{Re}$, и в этом случае имеем

$$\lambda = 0,1 \left(\frac{\Delta}{d_s} \right)^{0,25}. \quad (5)$$

Описание лабораторной установки

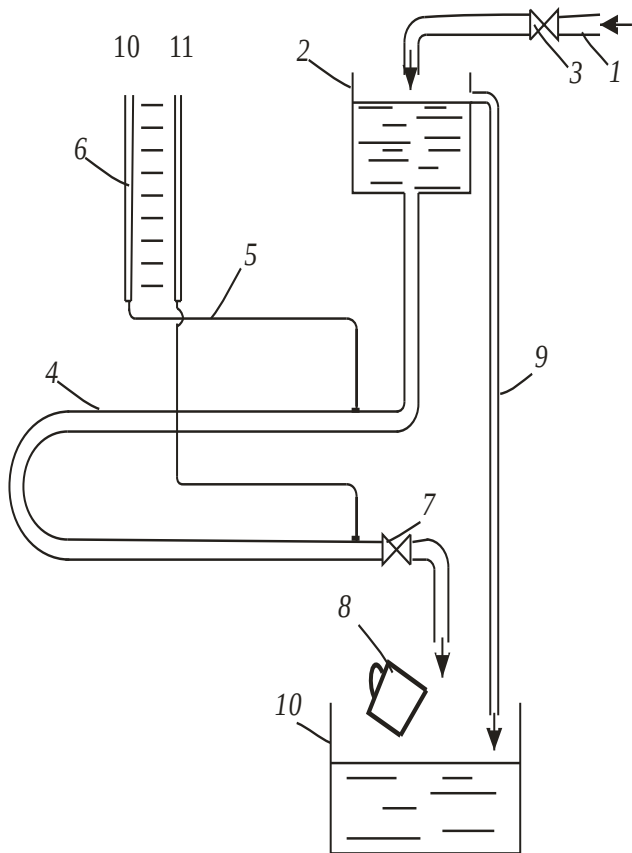


Рис. 1. Схема лабораторной установки для исследования коэффициента гидравлического трения:
1-водопровод; 2-расходный бак; 3, 7-краны; 4-опытная трубка; 5-импульсная трубка; 6-пьезометр; 8-мерная емкость; 9-переливная трубка; 10-приемный бак

Схема установки приведена на рис. 1. Вода из водопровода 1 поступает в расходный бак 2, откуда подается в прозрачную опытную трубку 4 с верхним и нижним участками. Во входном и выходном сечениях трубы имеются сверления в стенках, из которых через трубки 5 жидкость поступает к пьезометрам 6 для измерения напора потока. На стенде пьезометры значатся под номерами 10 и 11.

Регулирование расхода воды через опытную трубку 4 осуществляется краном 7, а измерение расхода - с помощью мерной емкости 8. При работе установки должен поддерживаться постоянный уровень воды в расходном баке 2. Это достигается за счет слива по трубе 9 избытка подаваемой в бак 2 воды из водопровода 1. Потоки воды из опытной трубы 4 и переливной

трубы 9 поступают в приемный бак 10.

Порядок выполнения работы

Убедиться, что вода из водопровода 1 поступает в расходный бак 2 и идет перелив избытка воды через трубу 9.

Медленно открывая кран 7 и наблюдая за показаниями пьезометров 6, прекратить открытие крана 7 при достижении разности уровней столбов жидкости в пьезометрах 6 примерно $10 \div 15$ мм вод. ст. Снять показания пьезометров и измерить расход жидкости с помощью мерной емкости 8.

Далее, постепенно открывая кран 7, устанавливать расходы жидкости ($5 \div 6$ раз до максимального значения) при которых измерить напоры в пьезометрах и величину расхода. При этом нужно наблюдать за наличием стока из переливной трубы 9 и при необходимости увеличивать подачу воды в расходный бак 2, открывая кран 3 на водопроводе 1.

Температура воды измеряется термометром в приемном баке 10. Результаты измерений заносятся в табл. 1. После завершения измерений перекрыть кран 3 для подачи воды из водопровода 1.

Обработка опытных данных

Для каждого опытного измерения производятся вычисления в следующем порядке.

1. Расход воды $Q = \frac{V}{\tau}$, м³/с, где V – количество воды, поступившей в мерную емкость, м³; τ – время заполнения мерной емкости, с.

2. Средняя в сечении скорость движения воды в опытной трубе $w = \frac{4Q}{\pi d^2}$, м/с, где d – внутренний диаметр трубы, равен 0,012 м.

3. Число Рейнольдса $Re = \frac{w \rho}{\mu}$, где ρ – плотность и μ – динамический коэффициент вязкости воды, берутся из табл. П-1 (приложения) при измеренной температуре.

4. Напор, затрачиваемый на преодоление сопротивления трения в опытной трубе $h_{тр} = h_0 - h_{11}$ вод. ст., где h_{10} и h_{11} – измеренные уровни в пьезометрах 10 и 11.

5. Опытный коэффициент гидравлического трения $\lambda_{тр} = h_{тр} \frac{2gd}{w^2 l}$, где l – длина опытной трубы по пути следования потока между входным и выходным сечением, равна 2,275 м.

6. Расчетный коэффициент гидравлического трения λ_p определяется в зависимости от величины числа Re по формуле (2) или по (4).

Результаты расчетов заносятся в таблицу 1. На миллиметровой бумаге строятся графики зависимостей $\lambda_{от} = f(Re)$ и $\lambda_p = f(Re)$. При наличии расхождений кривых устанавливается возможная причина различия.

Таблица 1.

№ опыта	Показания пьезометров		Температура воды t , °C	Объем воды V , м ³	Время заполнения мерной емкости τ , с	μ , Па·с	ρ , кг/м ³	Расход воды Q , м ³ /с	w , м/с	Re	$h_{тр}$, м вод. ст	$\lambda_{оп}$	λ_p
	h10, м вод. ст.	h11, м вод. ст.											
1													
2													
3													
...													

Контрольные вопросы

1. Виды гидравлических сопротивлений.
2. Уравнение Бернулли. Статистический, геометрический, скоростной напоры.
3. Определение потерь напора на трение.
4. Влияние шероховатости стенок канала на потери напора.
5. Влияние скорости на потери напора.
6. Эквивалентный диаметр.
7. Режимы движения жидкости, число Re.
8. Единицы измерения p , μ , ρ .
9. Уравнение расхода.

Лабораторная работа №3

Определение коэффициентов местных сопротивлений

Цель работы: опытное определение коэффициентов местных сопротивлений расширения и сужения трубы, колена, плавного закругления, крана, вентиля; сравнение опытных значений ξ с расчетными и табличными данными.

Теоретические основы

Наряду с потерями напора на преодоление сил вязкого трения, которые пропорциональны длине канала, поток жидкости теряет свой напор в местных сопротивлениях – запорная и регулирующая арматура (краны, вентили, задвижки), повороты, расширения или сужения трубопроводов. В этих элементах трубопроводных систем происходит изменение скорости потока жидкости либо по величине, либо по направлению, либо одновременно по величине и направлению. И потери на трение и потери в местных сопротивлениях, в конечном счете, обусловлены вязкостью жидкости, а следовательно, теряемая механическая энергия рассеивается и переходит в тепловую.

В инженерной практике потери напора h_m (или давления $\Delta P_m = \rho g h_m$) потока в местных сопротивлениях определяют по формуле Вейсбаха

$$h_m = \xi \frac{w^2}{2g}, \text{ или } \Delta P_m = \xi \frac{\rho w^2}{2}, \text{ Пз} \quad (1)$$

где w – средняя скорость движения потока, м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение в поле действия силы тяжести, равно 9,81 м/с²; ξ – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициенты различных видов местных сопротивлений находят обычно опытным путем, их средние значения приводятся в справочной и учебной литературе. Для определенного вида местного сопротивления ξ зависит от числа Рейнольдса, если течение ламинарное, и становится постоянной величиной при развитом турбулентном режиме течения. В формуле (1) скорость может быть принята до или после сопротивления. В зависимости от этого разными будут численные значения коэффициента ξ . Поэтому всегда нужно указывать какая скорость выбрана в качестве определяющей при вычислении ξ . Чаще используется в качестве определяющей максимальная скорость в местном сопротивлении, отнесенная к минимальному его проходному сечению.

В технических устройствах часто встречаются внезапные расширения и сужения канала. При внезапном расширении, например, напор теряется вследствие удара потока, выходящего с большой скоростью из части трубопровода с меньшим диаметром, в поток, движущийся медленнее в части, где диаметр больше. При этом, в области, примыкающей к прямому углу трубы более широкого сечения, возникают обратные токи – завихрения,

на образование которых бесполезно тратится часть энергии потока. Коэффициент местного сопротивления, отнесенный к скорости в меньшем сечении, может быть определен по формулам:

$$\text{для сужения } \xi = 0,5(1 - d/D) \quad (2)$$

$$\text{для расширения } \xi = (1 - d/D)^2, \quad (3)$$

где d – диаметр малого сечения канала; D – диаметр большого сечения канала. Значения коэффициентов ξ для некоторых местных сопротивлений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты местных сопротивлений

Вид местного сопротивления	Коэффициент местного сопротивления
Колено (без закругления) с поворотом потока на 90°	1,1-1,3
Плавное закругление (отвод) на 90° с относительным радиусом $R/d \geq 3$	0,08-0,1
Кран пробковый:	
- при полном открытии;	0,2
- при угле открытия 30-40°	4-11
Вентиль нормальный	4,5-5,5

Описание лабораторной установки

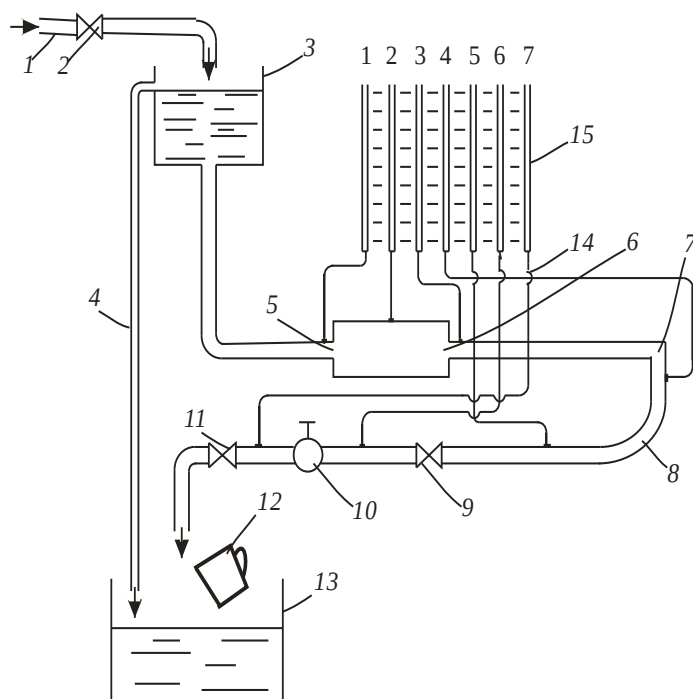


Рис. 1. Схема лабораторной установки для определения коэффициентов местных сопротивлений: 1-водопровод; 2, 9, 11-краны; 3-расходный бак; 4-переливная трубка; 5-внезапное расширение; 6-внезапное сужение; 7-колесо без закругления; 8-закругленное колено; 10-вентиль; 12-мерный сосуд; 13-приемный бак; 14-импульсная трубка; 15-пьезометр

Схема установки приведена на рис.1. Из водопровода 1, с регулируемым краном 2 расходом, вода поступает в расходный бак 3. Для поддержания постоянного уровня жидкости бак 3 снабжен переливной трубкой 4. Из расходного бака 3 вода под постоянным напором подается в контур, в котором последовательно проходят местные сопротивления: внезапное расширение трубы 5; внезапное сужение 6; колесо без закругления 7; отвод с закруглением 8; кран пробковый 9; вентиль 10. Расход воды через контур устанавливается краном 11 и измеряется с помощью мерной емкости 12. Слив воды из контура и переливной трубы

осуществляется в приемный бак 13. Через сверления в стенке контура и трубки 14 подается вода в пьезометры 15 для измерения напора в сечениях

потока до и после каждого местного сопротивления. Цифры над пьезометрами на рис. 1 соответствуют их номерам на стенде.

При работе установки должен поддерживаться постоянный уровень воды в расходном баке 3. Это достигается за счет слива по трубе 4 части избыточно подаваемой в бак 3 воды из водопровода 1.

Порядок проведения работы

Открыв кран 2, наполнить водой бак 3 до отверстия слива в переливную трубу. Затем, медленно открывая кран 11, установить расход воды через контур при котором минимальная разность уровней жидкости в каких-либо двух соседних пьезометрах станет равной не менее 2-5 мм вод. ст. Проверить, что идет слив воды через переливную трубу 4. При необходимости увеличить подачу воды из водопровода больше открыть кран 2. При установившемся режиме измерить уровни жидкости в пьезометрах, расход воды с помощью мерной емкости 12 и температуру воды термометром (в приемном баке 13). Занести результаты измерений в таблицу 2. Далее, последовательно увеличивая расход через контур открытием крана 11, аналогичным образом проводятся измерения при разных расходах, вплоть до максимально возможного. Всего выполняется от 3-х до 6-ти опытных измерений. После завершения измерений перекрыть кран 2 на водопроводе.

Обработка опытных данных

Для каждого опытного измерения производятся вычисления в следующем порядке.

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

где V – количество воды, поступившей в мерную емкость, м^3 ; τ – время заполнения мерной емкости, с.

2. Определяющая (минимальная) для местных сопротивлений контура

скорость движения воды
$$w = \frac{4Q}{\pi d^2}, \text{ м/с}$$

где d – внутренний диаметр малой трубы контура, равен 0,017 м.

3. Число Рейнольдса
$$\text{Re} = \frac{w \rho d}{\mu},$$

где ρ – плотность и μ – динамический коэффициент вязкости воды, берутся из справочника [3].

4. Коэффициент местных сопротивлений:

резкое расширение трубы
$$\xi = \left(1 - \frac{d_2}{d_1}\right)^2 \frac{1}{\alpha_2};$$

резкое сужение трубы
$$\xi = \left(1 - \frac{d_2}{d_1}\right)^2 \frac{1}{\alpha_2};$$

колесо без закругления	$\xi = (h_3 - h_2) \frac{2}{v_w^2};$
колесо с закруглением	$\xi = (h_4 - h_3) \frac{2}{v_w^2};$
кран пробковый	$\xi = (h_3 - h_2) \frac{2}{v_w^2};$
вентиль нормальный	$\xi = (h_3 - h_2) \frac{2}{v_w^2};$

где $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7$ – измеренные уровни воды в пьезометрах с соответствующими номерами на стенде. Размерность h_i – м вод. ст.

Наряду с местными сопротивлениями в контуре проявляется и сопротивление трения. Потеря напора потока, обусловлена трением, в коротком контуре сравнительно мала и для упрощения вычисления коэффициентов ξ здесь не учитывается. Полученные опытные значения коэффициентов ξ заносятся в таблицу 2. Они сравниваются с рассчитанными по формулам (2) и (3) и табличными (табл. 1) значениями. Диаметр D большого сечения канала принимается равным 0,069 м. При различиях расчетных и опытных значений ξ_i анализируются возможные причины расхождения.

Таблица 2

Результаты измерений и сравнение значений ξ

№ опыта	Показания пьезометров, м вод. ст.							$t, ^\circ\text{C}$	$V, \text{м}^3$	$\tau, \text{с}$	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$w, \text{м/с}$	Re	Опытные значения коэффициента местных сопротивлений					
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7							ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4	ξ_5	ξ_6
1																			
2																			
3																			
4																			
5																			
Расчетные и табличные значения ξ :																			

Контрольные вопросы

1. В какую форму переходит механическая энергия потока, теряемая при движении?
2. Чем обусловлены местные сопротивления?
3. Как вычисляются потери напора на преодоление местных сопротивлений?
4. Как меняются скорость и давление потока при его внезапном расширении?
5. Почему уровень воды в расходном баке должен поддерживаться постоянным при проведении опыта?

Лабораторная работа №4

Определение коэффициента расхода и построение тарировочной кривой водомера Вентури

Цель работы: экспериментальное и теоретическое исследование водомера основанного на принципе сужения проходного сечения потока.

Теоретические основы

Для измерения расходов различных жидкостей широко распространены дроссельные расходомерные устройства, к которым относятся расходомерные диафрагмы, сопла и водомеры Вентури. Принцип работы этих приборов основан на искусственном изменении скорости потока за счет сужения водотока и получения перепада давления Δh , который фиксируется с помощью пьезометров.

Для определения теоретического (расчетного) расхода V_T используются уравнение Бернулли (без учета потерь на трение)

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (1)$$

и уравнение неразрывности

$$V_1 S_1 = V_2 S_2 \quad (2)$$

где S - площадь поперечного сечения канала; V_T – теоретический объёмный расход воды; индексы 1 и 2 соответствуют положению до и после местного сопротивления.

После несложных преобразований получается формула для определения теоретического расхода через водомер

$$V_T = K S_1 \sqrt{\frac{2g}{(S_1/S_2)^2 - 1}} \sqrt{h}, \quad (3)$$

где $K \sqrt{\frac{2g}{(S_1/S_2)^2 - 1}}$ - разность показаний пьезометров, включенных в широкой и узкой частях водомера.

Величина $K \sqrt{\frac{2g}{(S_1/S_2)^2 - 1}}$ - постоянная водомера, определяется его конструкцией.

Действительный расход связан с теоретическим через коэффициент расхода водомера

$$\mu = \frac{V_0}{V_T}. \quad (4)$$

Следовательно, действительный расход можно определить по следующей зависимости:

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

Тарировочная кривая водомера Вентури представляет собой зависимость $V_d = f_1(\Delta h)$ и показана на рис.1.

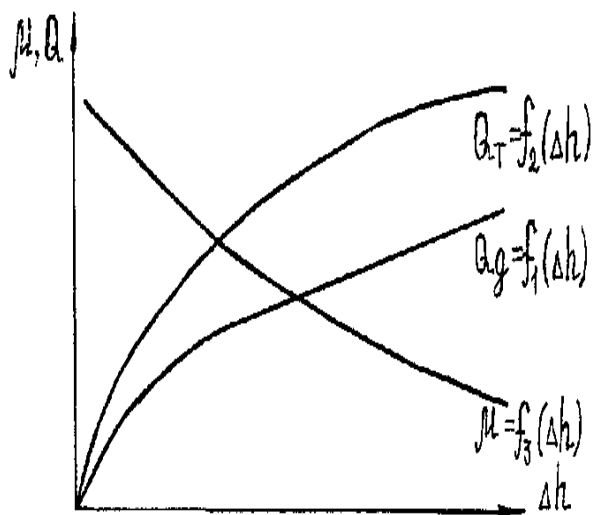


Рис. 1. Тарировочная кривая водомера Вентури

С помощью графика легко определить действительный расход через водомер, зная разность показаний пьезометров Δh . Для определения коэффициента расхода водомера необходимо вычислить действительный расход по опытным данным, затем для тех же показаний пьезометров Δh вычислить значение теоретического расхода V_T по формуле, указанной выше.

Описание лабораторной установки

На схеме рис.2 вода из напорного бака 1 поступает в водомер 15. С помощью крана 16 регулируется расход V_d , поступающий в нижний резервуар 8. В широкой и узкой частях водомера включены пьезометры 20, показывающие величину Δh . Мерная емкость 4 служит для определения действительного расхода V_d .

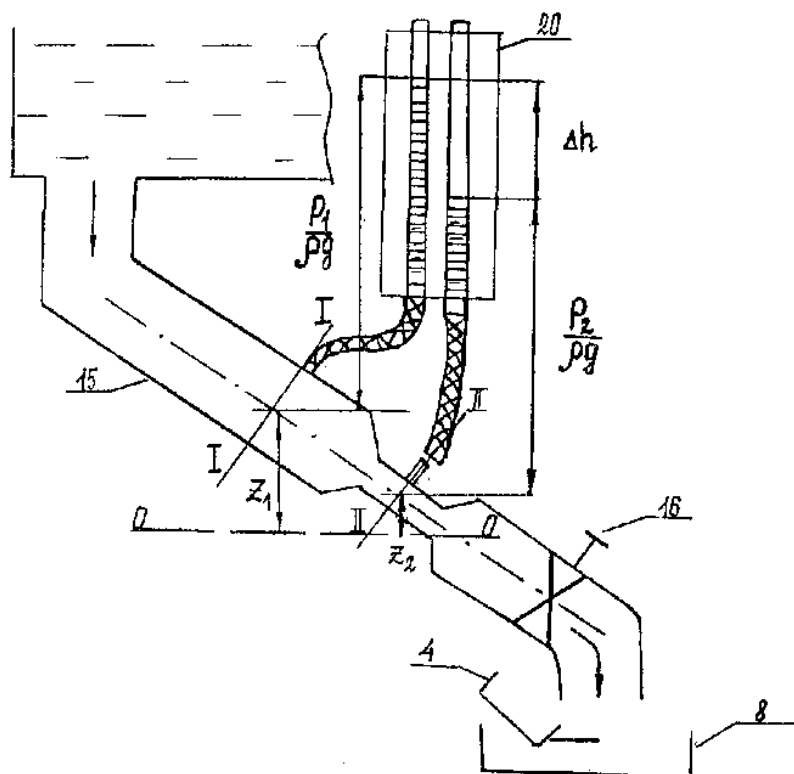


Рис. 2. Схема лабораторной установки

Контрольные вопросы

1. Для каких целей служит водомер Вентури?
2. Принцип действия водомера Вентури.
3. Какие уравнения лежат в основе работы водомера?
4. Что называется коэффициентом расхода водомера?
5. Методика определения действительного расхода?
6. Как изменяются скорость и давление при переходе от широкой к узкой части водомера?
7. Как влияет наклон водомера на показания пьезометров?
8. Для каких целей уровень воды в напорном баке поддерживается постоянным?
9. От каких факторов зависит постоянная К водомера?

Лабораторная работа №5

Исследование опорожнения сосуда непризматической формы

Цель работы: экспериментальное и теоретическое исследование закономерностей опорожнения сосуда непризматической формы

Теоретические основы

При решении различных гидравлических задач истечения жидкость из резервуаров возникает необходимость определить время, за которое уровень жидкости изменится на заданную величину, вытечет определенный объем жидкости и т.д.

При истечении жидкости из сосуда в последнем происходит непрерывное уменьшение напора, что представляет собой пример неустановившегося движения.

За малый отрезок времени $d\tau$ из сосуда (рис. 1) вытекает количество жидкости Vdt и уровень жидкости в сосуде изменится на величину dh . Следовательно,

$$Vd = -\Omega dh. \quad (1)$$

В правой части последнего равенства выбирается знак «-», так как напор уменьшается и dh - отрицательная величина.

Мгновенный расход определяется зависимостью

$$V = s\sqrt{2gh}, \quad (2)$$

где s - площадь отверстия; h - напор над центром отверстия в момент времени $d\tau$.

Таким образом ,

$$s\sqrt{2gh}dt = -\Omega dh, \quad (3)$$

где Ω - площадь зеркала (свободной поверхности жидкости).

Отсюда имеем

$$\tau = -\int_h^{h_2} \frac{\Omega dh}{s\sqrt{2gh}} \quad (4)$$

Постоянные величины можно вынести за знак интеграла

$$\tau = -\frac{1}{s\sqrt{2g}} \int_h^{h_2} \frac{\Omega dh}{\sqrt{h}} \quad (5)$$

Зная закон изменения площади зеркала от напора $\Omega=f(h)$, можно определить время опорожнения резервуара от отметки h_1 до отметки h_2 .

В частном случае, когда $\Omega=\text{const}$, сосуд называется призматическим и

$$t = \frac{2}{\sqrt{g}} \left(\frac{h_1}{\Omega} - \frac{h_2}{\Omega} \right) \quad (6)$$

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис.1) состоит из напорного бака 1, кранов 19, 18, непризматического сосуда с пьезометром, приемной емкости 21.

Наполнение резервуара осуществляется от емкости 1 через кран 19. Опорожнение - через кран 18 и приемную емкость 21.

Для определения времени опорожнения резервуара по формуле необходимо вычислить интеграл в правой части, что является затруднительным.

Предлагается воспользоваться одной из формул численного интегрирования (прямоугольников, трапеции, парабол):

$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{n=1}^N \Delta x_n f(x_n),$$

$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{n=1}^N \frac{\Delta x_n}{2} (f(x_{n-1}) + f(x_n)),$$

$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{n=1}^N \frac{\Delta x_n}{6} (f(x_{n-1}) + 4f(x_n) + f(x_{n+1})),$$

где n - число интегралов, на которые делится отрезок $[ab]$; f_n – значение подынтегральной функции в соответствующих узлах участка интегрирования.

Например, при пользовании формулой прямоугольников и делении отрезка интегрирования на 10 частей, получим

$$\int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{\Omega \sqrt{2g(h-h_2)}} \approx \sum_{i=1}^{10} \Delta h_i \frac{1}{\Omega \sqrt{2g(h_i - h_2)}}$$

На каждой лабораторной установке имеется таблица значений Ω_i и соответствующих им напоров h_i , с помощью которой легко вычислить интеграл по одной из формул.

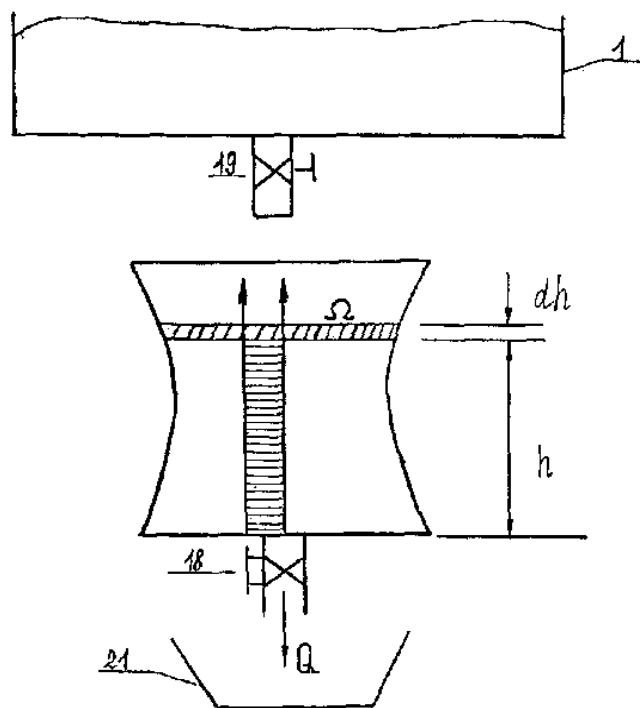


Рис.1. Схема лабораторной установки

Контрольные вопросы

1. Какой сосуд называется непризматическим?
2. Что такое коэффициент расхода?
3. Вид дифференциального уравнения неразрывности для опорожнения сосуда непризматической формы.
4. Какие методы приближенного вычисления интегралов Вам известны?
5. Как изменяется площадь зеркала при производстве опыта?
6. Какое движение называется неустановившимся?
7. Запишите выражение для определения времени опорожнения сосуда непризматической формы?
8. Что называется напором жидкости?
9. Что называется расходом жидкости?
10. Какой сосуд называется призматическим?

Лабораторная работа №6

Исследование истечения жидкости через отверстия и насадки

Цель работы: опытное определение коэффициентов скорости φ , расхода μ , сжатия струи ε и местного сопротивления ζ при истечении жидкости через отверстия и насадки, при полном сжатии.

Теоретические основы

Для нахождения расхода и скорости при истечении через малое отверстие в тонкой стенке при постоянном напоре составляется уравнение Л.Бернулли для сечений I-I и II-II и плоскости сравнения 0-0 (см. рис. 1).

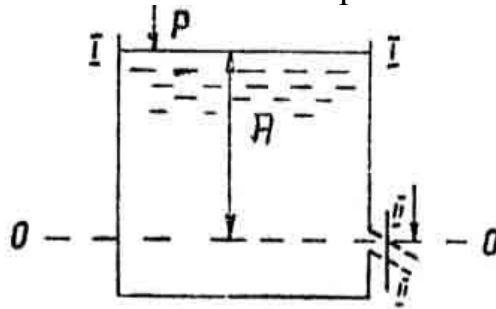


Рис.1. Схема определения расхода и скорости

Сечение I-I принимается по поверхности жидкости в резервуаре. Сечение струи II-II называется сжатым сечением. Опыты показывают, что за счет боковой скорости подхода жидкости происходит сжатие струи. Наибольшее сжатие струи происходит после отверстия, примерно на расстоянии половины диаметра отверстия.

Плоскость сравнения проходит через центр отверстия.

Тогда для этих сечений уравнение Д. Бернулли запишется

$$H = \frac{V^2}{2g} + h_{1-2}$$

Учитывая, что $h_{1-2} = \zeta \frac{V^2}{2g}$, получим:

$$H = \frac{V^2}{2g} (1 + \zeta)$$

Решая относительно средней скорости получаем основную расчетную формулу:

$$V = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (1)$$

где φ - коэффициент скорости;

h_{1-2} - потери напора между сечениями I-I и II-II;

V - скорость;

ζ - коэффициент местного сопротивления; H - напор.

Физическую суть коэффициента скорости можно увидеть из выражения (1).

$$\varphi = \frac{V}{\sqrt{2gH}} = \frac{V}{V_T},$$

т.е. коэффициент скорости представляет собой отношение скорости действительной к скорости теоретической, ибо $V_T = \sqrt{2gH}$ - скорость истечения «идеальной жидкости». Для нахождения расхода умножим скорость, полученную (1), на площадь сечения II – II, то есть на площадь сжатого сечения струи.

Получим

$$Q = \varepsilon \omega \varphi \sqrt{2gH}.$$

Вводим обозначение $\varepsilon \varphi = \mu$,

тогда окончательно получаем

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

μ - коэффициент расхода.

Из выражения (2) находим μ

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}} = \frac{Q_d}{Q_T},$$

т.е. коэффициент расхода при истечении – это отношение действительного расхода к теоретическому. Формулы (1) и (2) являются основными расчетными формулами для определения скорости и расхода при истечении жидкости через отверстия и насадки. Коэффициенты μ и φ определяются экспериментально или берутся из справочников в зависимости от геометрии отверстия или насадки и, как показали последние исследования, от числа Рейнольдса, которое следует определять по формуле:

$$Re = \frac{\sqrt{2gH}d}{\nu}$$

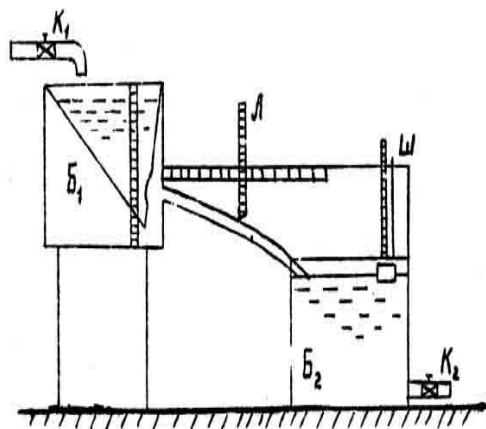


Рис.2.Схема лабораторной установки

Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки показана на (рис.2). Вода из водопровода поступает в бак B_1 и расход ее регулируется краном K_1 . В боковой стенке напорного бака, обращенной к мерному баку B_2 , имеется отверстие, через которое происходит истечение. Конструкция установки позволяет менять геометрию отверстия или заменить отверстие насадкой. Отверстие закрывается при помощи резиновой шторки, укрепленной на оси вверху бака и прижимаемой к стенке при помощи груза или давления воды. Оттягивание шторки от стенки бака (открытие отверстия) производится при помощи перекинутого через блок на крышке бака B_1 тросика. На боковой стенке напорного бака установлен пьезометр Π , по которому отсчитывается напор над центром отверстия. Для определения координат точек оси струи между напорными и мерными баками установлено устройство, состоящее из двух линеек: вертикальной (для измерения координаты y) и горизонтальной (для измерения координаты x). Вытекающая струя попадает в мерный бак, на крышке которого установлена шкала Π , показывающая объем воды, поступающей в бак. Вода из мерного бака спускается по сливной трубке в канализацию открытием вентиля K_2 .

Обработка опытных данных

1. Определение коэффициента расхода.

Для определения коэффициента расхода $\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}$, необходимо знать расход, напор над центром отверстия H и диаметр d отверстия, так как

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Диаметр отверстия указан на установке, в случае наличия насадки ее данные выбиты на нем. Напор над центром отверстия определяется по пьезометру, установленному на напорном баке, и поддерживается на определенном уровне с помощью крана K_1 . (Величина напора каждый раз задается преподавателем). Расход определяется объемным способом, для этого закрывают сливной вентиль K_2 сборного резервуара установки. Вся вода в этом случае собирается в сборном резервуаре, снабженном поплавковым устройством, по которому можно знать сколько в данный момент находится жидкости в резервуаре. По мере истечения количество жидкости будет увеличиваться. Замерив в какой-то момент времени начальный объем жидкости W_1 , включают секундомер и, набрав 3-5 литров, измеряют время, в течение которого набралось это количество воды. Тогда расход можно определить так:

$$Q = \frac{W_2 - W_1}{t}.$$

где W_1 – объем жидкости в начале наблюдения;
 W_2 – объем жидкости в конце наблюдения;
 t – время, в течение которого вытек объем.
 Затем вычисляют коэффициент расхода:

$$\mu = \frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2gH}}.$$

2. Определение коэффициента скорости.

Существует два способа определения коэффициента скорости.

Если прибор оснащен измерителем, то с его помощью можно измерить площадь сжатого сечения струи.

Так как струя в сжатом сечении имеет форму эллипса, измеряют оси эллипса a и b .

Затем вычисляют по формуле $\varphi = \frac{\mu}{\varepsilon}$.

При нахождении коэффициента скорости φ погрешность измерения в десятые доли миллиметра дает существенные ошибки, т.к. измерения производятся с помощью микрометров. Кроме того, этот способ непригоден для нахождения коэффициентов ε и φ для насадок.

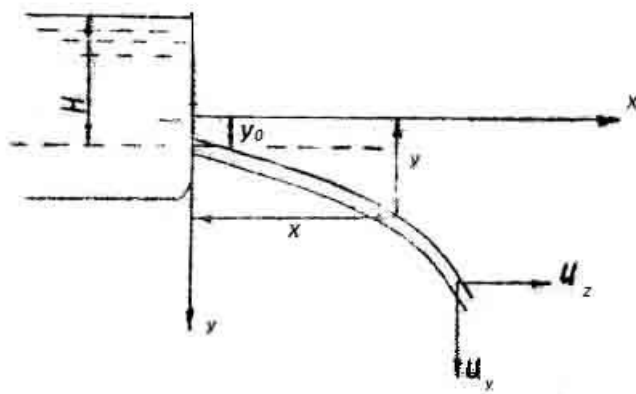


Рис.3. Схема определения координаты струи

Координата x должна обязательно отсчитываться от плоскости отверстия, y – может отсчитываться от любого уровня, тогда:

$$\begin{aligned} U_x &= \varphi \sqrt{2gH} \\ U_y &= gt \\ X &= U_x t = \varphi t \sqrt{2gH} \\ Y &= U_y = \frac{gt^2}{2} \end{aligned}$$

Уравнение траектории есть уравнение параболы:

$$y = \frac{g}{2} \frac{x^2}{\varphi^2 g H} = \frac{x^2}{4\varphi^2 H}$$

или

$$y - y_0 = \frac{x^2}{4\varphi^2 H}.$$

По этому способу обычно берут два значения x и y и находят φ по:

$$\varphi = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{1}{yH}} = \frac{x}{2\sqrt{yH}}.$$

Взяв другую пару x и y , получают другое значение φ , т.е. имеет место разброс из-за погрешностей в измерениях. Для исключения погрешностей линеаризуем уравнение траектории струи, вводя новые координаты $Y = y$, $X = x^2$.

Получаем линеаризованное уравнение траектории

$$Y = Y_0 + \frac{X}{4H\varphi^2}.$$

В новой системе координат траектория струи будет представляться прямой линией (рис. 4).

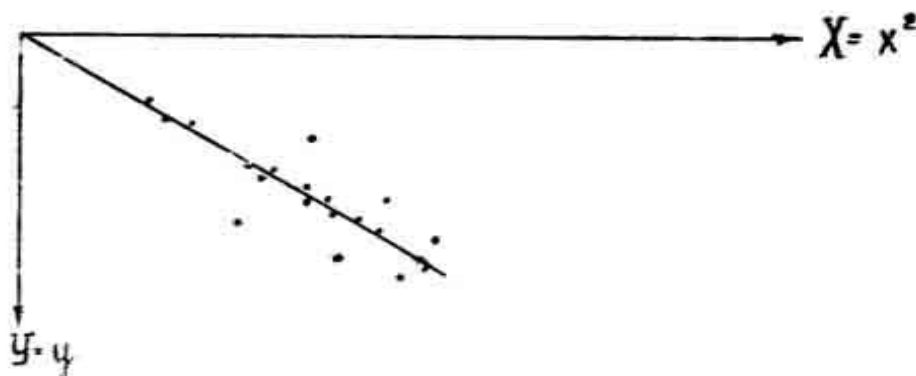


Рис.4.Схема определения траектории струи

Рисунок 4 наглядно показывает ошибочные измерения, которые следует исключать при последующей обработке. Точки экспериментов должны ложиться около прямой.

Используя способ наименьших квадратов (необходимо для исключения ошибок провести не менее 20 измерений x и y), получим:

$$\frac{1}{4H\varphi^2} \sum X_i + iY_0 = \sum Y_i$$

или

$$\frac{1}{4H\varphi^2} \sum x_i^4 - y_0 \sum x_i^2 = - \sum x_i^2 y_i$$

.Решая систему относительно φ ,получим:

$$\varphi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{i \sum x_i^4 - (\sum x_i^2)^2}{H(\sum x_i^2 \sum y_i - i \sum x_i^2 y_i)}},$$

где i – число измерений пар x и y не менее 20;

H – напор над центром отверстия из насадка.

В отчете по лабораторной работе необходимо представить схему установки, формы отчетных листов и вычисленные значения коэффициентов расхода μ , скорости φ , сжатия струи ε и местного сопротивления ζ .

Для определения коэффициентов расхода отверстий и насадок, необходимо составить форму отчетного листа по табл.1.

Таблица 1.

№ опыта	Наименования отверстий или насадки, эскиз с размерами	W_1 , см ²	W_2 , см ³	t, с	H, см	$W = W_2 - W_1$, см	$Q = \frac{W}{t}$, см ³ /с	$\mu = \frac{Q}{\sqrt{2gH}}$

Коэффициент скорости определяется только для одного отверстия или насадка, заданного преподавателем. Результаты измерений и вычислений следует занести в форму отчетного листа в табл. 2.

Таблица 2.

№ опыта	x, см	y, см	x^2 , см ²	$x^2 y$, см ³	x^4 , см ⁴
1					
2					
...					
...					
...					
20					

Затем по формуле вычисляем коэффициент φ .

Коэффициент сжатия струи из ранее обозначенного $\varepsilon \varphi = \mu$ находим:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\varphi}$$

И коэффициент местного сопротивления ζ :

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

Для данного отверстия и насадка следует полученные коэффициенты свести в следующую табл.3.

Таблица 3.

Коэффициенты	μ	φ	ε	ζ
По справочным данным				
По опыту				

Контрольные вопросы

1. Когда отверстие считается малым?
2. Какая стенка называется тонкой?
3. По какой формуле определяется теоретическая скорость истечения жидкости через малое отверстие в тонкой стенке?
4. По какой формуле определяется действительная скорость истечения через малое отверстие в тонкой стенке?
5. По какой формуле определяется в процессе выполнения данной работы действительный расход жидкости, вытекающей из отверстия?
6. По какой формуле определяется теоретический расход жидкости при истечении через отверстие?
7. Что называется коэффициентом сжатия струи?
8. По какой формуле определяется коэффициент местного сопротивления при входе в отверстие?
9. Какие потери учитываются при изучении истечения жидкости через малое отверстие?
10. Укажите уравнение Бернулли для потока реальной жидкости.
11. От каких факторов зависит кинематический коэффициент вязкости.

Литература

1. Андрижиевский, А.А. Механика жидкости и газа [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Андрижиевский А.А.— Электрон. текстовые данные.— Минск: Вышэйшая школа, 2014.— 207 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/35498>.
2. Иваненко, И.И. Гидравлика [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Иваненко И.И.— Электрон. текстовые данные.— СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2012.— 150 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/18992.html>.
3. Зуйков, А.Л. Гидравлика. Том 1. Основы механики жидкости [Электронный ресурс]: учебник/ Зуйков А.Л.— Электрон. текстовые данные.— М.: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2019.— 520 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/30341.html>.
4. Моргунов, К. П. Механика жидкости и газа: учебное пособие / К. П. Моргунов. — 2-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург: Лань, 2018. — 208 с.

— ISBN 978-5-8114-3278-3. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/109512>

5. Доманский, И. В. Механика жидкости и газа: учебное пособие / И. В. Доманский, В. А. Некрасов. — Санкт-Петербург: Лань, 2018. — 140 с. — ISBN 978-5-8114-3158-8. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/110915>

6. <http://techn.sstu.ru/new/SubjectFGOS/Default.aspx?kod=980>

7. Косой В.Д., Рыжов С.А. Гидравлика. — М.: ДеЛи принт, 2008. — 495с.

Количество экземпляров: 5

8. Бутко Г.Ю. Механика жидкости и газа : учебное пособие / Бутко Г.Ю., Никифоров А.О.. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2018. — 100 с. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/102444.html>

9. Удовин В.Г. Гидравлика : учебное пособие / Удовин В.Г., Оденбах И.А.. — Оренбург : Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2014. — 132 с. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/33625.html>

10. Ловкис З.В. Гидравлика : учебное пособие / Ловкис З.В.. — Минск : Белорусская наука, 2012. — 448 с. — ISBN 978-985-08-1485-2. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/29444.html>

11. Цупров А.Н. Практикум по гидравлике и гидроприводу : учебное пособие / Цупров А.Н.. — Липецк : Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2013. — 66 с. — ISBN 978-5-88247-620-4. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/22908.html>

12. Идеальчик И.Е.Справочник по гидравлическим сопротивлениям./ Под ред. М.О. Штейнберга. — М.: Машиностроение, 1992- 672с.

13. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: ООО «ИД Альянс» 2009. — 753с.

14. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. М.: ООО «ИД Альянс», 2006. — 576с.

15. Сапухин А.А. Основы гидравлики [Электронный ресурс]: учебное пособие с задачами и примерами их решения/ Сапухин А.А., Курочкина В.А.— Электрон. текстовые данные.— М.: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2014.— 112 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/30350.html>.