

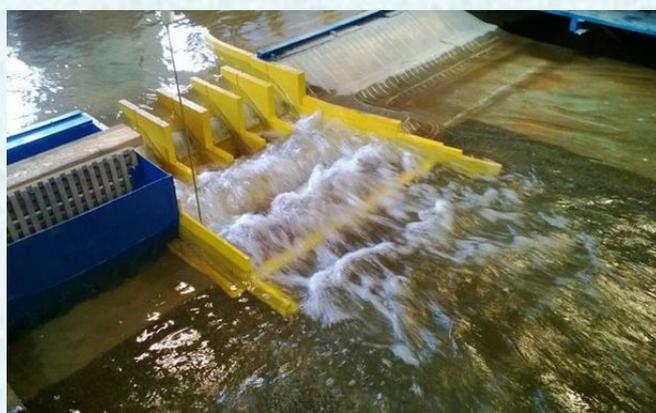
**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
- МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА**

Фартуков В.А., Зборовская М.И., Алексеев Д.А.

**МЕТОДЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



Москва

РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

2022

УДК 626. 627
ББК 38.37
Ф 25
DOI 10.26897/978-5-9675-1975-8-2022-123

Рецензенты:

Козырь И.Е., кандидат технических наук, профессор кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова
Щербakov А.О., кандидат технических наук, заведующий отделом гидротехники и гидравлики ФГБНУ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова

Фартуков, В.А. МЕТОДЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ: Учебное пособие / В.А. Фартуков, М.И. Зборовская, Д.А. Алексеев; Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева. – Москва: РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2022. – 123 с. – Текст : электронный.
ISBN 978-5-9675-1975-8

Учебное пособие предназначено для выполнения студентами исследовательских работ по гидравлике гидротехнических сооружений. Дано описание экспериментальных установок и приборов, основные понятия и расчётные зависимости, порядок выполнения опытов и обработки полученных результатов. Учебное пособие адресовано магистрам по направлению «Строительство», а также аспирантам направления «Техника и технологии строительства».

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией ИМВХС имени А.Н. Костякова РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, протокол № 3 от 19 декабря 2022 г.

Fartukov, V.A. HYDRAULIC RESEARCH METHODS HYDROTECHNICAL STRUCTURES: Study Guide / . – V.A. Fartukov, M.I. Zborovskaya, D.A. Alekseev; Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev. - Moscow: RGAU-MSHA named after K. A. Timiryazev, 2022. - 123 p. – Text : electronic.

©Фартуков В.А., Зборовская М.И., Алексеев Д.А., 2022
© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2022

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие по методам гидравлических исследований гидротехнических сооружений содержит описание и методику проведения исследовательских работ, иллюстрирующих законы равновесия и движения жидкостей через гидротехнические сооружения.

Учебное пособие написано для обучающихся по направлениям подготовки для обучающихся по направлениям подготовки 08.04.01 Строительство направленность Речные и подземные гидротехнические сооружения (дисциплины Основы научных исследований, Расчёты и исследования гидротехнических сооружений), а также направления 08.06.01 Техника и технологии строительства, программа Гидротехническое строительство (аспиранты) Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Учебное пособие состоит из двух глав со справочными материалами, которые используются при выполнении исследовательских работ. В первой главе дано описание приборов для измерения основных гидравлических параметров и характеристик потока, содержатся методы оценки погрешности измерений, используемые при определении точности результатов эксперимента.

Во второй основной главе учебного пособия дано описание исследовательских работ по изучению кинематики потока и режимов движения жидкости на гидротехнических сооружениях (при пульсации скоростей и давлений в потоке на водосливе, рисберме, водобое, демонстрации уравнения Бернулли, определение потерь напора при движении по гидротехническому сооружению, истечению жидкостей через отверстия и насадки при постоянном и переменном напорах, изучению гидравлического удара в трубах).

В учебном пособии к работам по общей гидравлике для каждой работы указаны цели и задачи работы, приводится описание экспериментальных установок и используемых приборов, излагаются основные понятия и расчётные зависимости, порядок выполнения опытов и обработки полученных результатов. Дается форма журнала для записи и обработки опытных данных.

Перед каждой работой студенты должны с помощью настоящего практикума самостоятельно ознакомиться с содержанием работы и основными теоретическими положениями, изучить порядок проведения измерений и обработки опытных данных, начертить в журнале схему экспериментальной установки и выписать расчётные формулы. Приведённые в описании исследовательских работ контрольные вопросы могут быть использованы студентами для самопроверки.

Предварительный контроль усвоения студентами материала учебного пособия и его практического применения проводится преподавателем с помощью опроса или в компьютерном классе с использованием контрольно-обучающих программ.

При выполнении исследовательских работ студенты должны освоить способы измерения основных гидравлических величин, ознакомиться с измерительными приборами и методами обработки результатов. По окончании

работы студенты анализируют её результаты, полученные в экспериментах величины сравнивают со справочными данными или с вычисленными по известным формулам, делают соответствующие выводы.

Методика и порядок проведения работ описаны с расчётом на возможность выполнения студентами полного объёма работы самостоятельно. Обеспечению самостоятельности при проведении работы и хорошему усвоению материала способствует условие, при котором состав группы, проводящей работу на экспериментальной установке, не превышает четырёх-пяти студентов.

2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

При проектировании гидротехнических сооружений проводят теоретические расчёты и модельные исследования. Для ответственных сооружений модельные исследования проводятся обязательно.

При проведении лабораторных экспериментальных исследований гидротехнических сооружений на моделях определяют работу сооружений в натуральных условиях.

Исследования гидравлических параметров для натуре проводят в лаборатории на моделях, выполненных в некотором масштабе, в соответствии с правилами моделирования.

Рассматривают физическое, аналоговое, численное моделирование.

Физическое моделирование исследует параметры, которые идентичны физическим параметрам натуре, таким как плотины, каналы и т.п.

Аналоговое моделирование применяют когда натура и модели имеют разную физическую природу, но при этом описываются аналогичными системами математических уравнений. Примером аналогового моделирования является исследование движения грунтовых вод методом ЭГДА (метод электрогидродинамической аналогии).

Численное моделирование – решение задач гидравлики с помощью пакетов прикладных программ на компьютере.

В основе физического моделирования лежат законы динамического подобия. Параметры будут подобны при одинаковом отношении всех геометрических размеров, перемещений, плотности, кинематических параметров, действующих сил.

Механическое подобие будет выполнено, когда будут подобны геометрические, кинематические и динамические характеристики.

В основе геометрического подобия находятся кинематические и динамические подобия. Для выполнения условия геометрического подобия модели и натуре должны быть подобны геометрические размеры, углы, то есть масштаб модели должен быть определён

$$M_L = L_H / L_M,$$

где M_L - масштаб модели, L_H – линейный параметр природы, линейный параметр модели.

Соотношение площадей

$$M_\omega = \omega_H / \omega_M, \quad M_L^2 = M_\omega,$$

где ω_H – площадь природы, ω_M – площадь модели.

Соотношение объёмов

$$M_W = W_H / W_M, \quad M_L^3 = M_W.$$

Кинематическое подобие – траектории, описываемые сходственными частицами обоих потоков – геометрически подобны, тогда масштаб движения частиц потока M_t будет иметь вид

$$M_t = T_H / T_M,$$

где T_H и T_M – время прохождения частицами потока отрезка траектории L соответственно природы и модели.

Динамическое подобие – все силы одинаковой природы, действующие в обеих геометрически подобных системах, должны быть одинаковыми для данных условий.

$$M_p = P_H / P_M,$$

M_p – масштаб динамического подобия сил,

P_H – сила, действующая на природе,

P_M - сила, действующая на модели.

Гидродинамическое подобие будет соблюдено тогда, когда будет выполнено равенство критериев Ньютона

$$Ne_H = Ne_M,$$

$$\text{где } Ne = \frac{P}{\rho L^2 V^2}, \quad \frac{P_H}{\rho_H L_H^2 V_H^2} = \frac{P_M}{\rho_M L_M^2 V_M^2}.$$

Гравитационное подобие будет выполнено, если силы инерции и силы тяжести природы будут идентичны силам инерции и силам тяжести модели.

$$\frac{\text{Сила инерции}}{\text{Сила тяжести}} = \frac{V^2}{gL} = Fr \quad \text{– Критерий Фруда;}$$

Закон вязкого подобия (Re)

$$\frac{\text{Сила инерции}}{\text{Сила тяжести}} = \frac{VL}{\nu} = Re \quad \text{– критерий Рейнольдса.}$$

Закон подобия сил поверхностного натяжения (We)

$$\frac{\text{Сила инерции}}{\text{Сила поверхностного натяжения}} = \frac{V^2 L}{\alpha_{\text{кап}}/\rho} = We = idem - \text{критерий Вебера},$$

где $\alpha_{\text{кап}}$ – капиллярная постоянная;

ρ – плотность.

Закон подобия сил упругости (Ca)

$$\frac{\text{Силы инерции}}{\text{Силы упругости}} = \frac{V^2}{E/\rho} = Ca = idem - \text{критерий Коши},$$

где E – модуль упругости.

Критерий подобия Эйлера (Eu)

$$\frac{\text{Сила давления}}{\text{Сила инерции}} = \frac{P}{\rho V^2} = Eu = idem \quad \text{или} \quad Eu = \frac{h}{V^2/g}.$$

В случае исследования неустановившегося движения жидкости необходим учёт кинематического критерия (гомохронности Ho).

$$\text{Число Струхала } Sh = Ho = \frac{L}{TV} = idem.$$

где T – период колебания волн,

$$n = 1/T - \text{частота.}$$

При моделировании неустановившегося движения жидкости необходимы следующие критерии:

При исследовании потоков жидкости с высокой турбулентностью необходим учёт критерия турбулентного подобия – Ka – число Кармана

$$Ka = V_1/V = idem,$$

где V_1 – пульсационная составляющая скорости (средние квадратические отклонения);

V – осреднённая по времени скорость.

Критериальное уравнения для моделей без размыва русла и транспорта наносов будет иметь следующий вид:

$$F = (Fr, Re, Eu, Sh, Ka, K/R, We) = 0.$$

При исследовании различных видов течений представления в критериальном уравнении критериев будут уточняться.

Например число Вебера We можно не учитывать вообще, так как этот критерий влияет на кавитацию и аэрацию потока. Число Струхала Sh учитывают при исследовании неустановившегося течения. Для установившегося напорного течения число Фруда Fr не учитывают и критериальное уравнение будет иметь вид

$$F = (Eu, Re, K/R) = 0.$$

Для случая, когда число Рейнольдса $Re > R_{гр}$. – зона автомодельности.

При моделировании течений в открытых руслах (со свободной поверхностью) гидротехнических сооружений (гидроузлов) основным условием является выполнение критерия - Фруда Fr .

$$F = (Fr, Re, Eu, K/R) = 0.$$

В некоторых случаях допускается неучет относительной шероховатости русла, то есть параметр K/R в некоторых случаях может быть исключён из критериального уравнения. Для случаев, когда коэффициент Дарси λ и коэффициент шероховатости Шези C для открытого русла

$$C = \frac{1}{n} R^y,$$

где n – коэффициент шероховатости, R – гидравлический радиус, y – показатель степени, $y = 1/6$.

Для случая, когда λ и C зависят только от относительной шероховатости K/R и не зависят от числа Рейнольдса Re , тогда гидродинамическое подобие будет выполнено при точном геометрическом подобии модели и натуры.

Соотношение расходов жидкости для натуры и модели при выполнении критерия Фруда $Fr = idem$

$$\frac{Q_n}{Q_m} = \frac{\omega_n V_n}{\omega_m V_m} = M_L^2 M_L^{0.5} = M_L^{2.5},$$

то есть расход на модели при масштабе M_L должен быть в $M_L^{2.5}$ раза меньше, чем в натуре.

Время протекания процесса (масштабный множитель времени)

$$M_t = M_L M_V^{-1} = M_L M_L^{-0.5} = M_L^{0.5},$$

то есть время протекания процесса в натуре будет в $\sqrt{M_L}$ раз больше, чем на модели.

При исследовании волновых процессов основным критерием моделирования является критерий Фруда Fr и критерий Струхала Sh при условии соблюдения геометрического подобия. В случае волн малой высоты учитывают критерий Вебера, то есть существенное влияние сил поверхностного натяжения.

2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Общие сведения

Гидростатическим давлением называют нормальное сжимающее напряжение, возникающее в покоящейся жидкости под действием поверхностных и массовых сил.

Абсолютное (полное) давление в любой точке покоящейся жидкости определяется по формуле:

$$p_{\text{полн.}} = p_0 + \rho gh, \quad (2.1)$$

где p_0 - абсолютное давление на поверхности жидкости $[\text{н/м}^2]$, ρ - плотность жидкости $[\text{кг/м}^3]$, g - ускорение силы тяжести $[\text{м/с}^2]$, h - глубина погружения точки под уровень жидкости $[\text{м}]$.

Манометрическое или избыточное давление $p_{\text{изб.}}$ — это давление сверх атмосферного ($p_{\text{атм.}}$), т.е.

$$p_{\text{изб.}} = p_{\text{полн.}} - p_{\text{атм.}} \quad \text{или} \quad p_{\text{изб.}} = p_0 + \rho gh - p_{\text{атм.}} \quad (2.2)$$

Если давление на поверхности жидкости равно атмосферному (в открытых резервуарах), то манометрическое давление будет $p_{\text{изб.}} = \rho gh$

Полное давление может быть и меньше атмосферного $p_{\text{полн.}} < p_{\text{атм.}}$. В этом случае разность между атмосферным и полным давлением называется вакуумметрическим давлением $p_{\text{вак.}}$:

$$p_{\text{вак.}} = p_{\text{атм.}} - p_{\text{полн.}} \quad \text{или} \quad p_{\text{полн.}} + p_{\text{вак.}} = p_{\text{атм.}} \quad (2.3)$$

Таким образом, вакуумметрическое давление означает недостаток до атмосферного давления.

Применяемые в гидротехнической практике единицы измерения давления и их взаимосвязь следующие:

$$1 \text{ атм.} = 98100 \text{ н/м}^2 = 98,1 \text{ кПа}$$

Атмосферное давление соответствует высоте столба жидкости: водяного - 10м; ртутного - 736мм.

Давление жидкости определяют с помощью приборов различных по принципу действия (жидкостные, механические, электрические, электрические, комбинированные и др.), по характеру измеряемой величины (барометры, манометры, вакуумметры, мановакуумметры), по точности измерения.

Барометры служат для измерения атмосферного давления; манометры - избыточного; вакуумметры- вакуумметрического. С помощью дифференциальных манометров устанавливают разность давлений в двух точках.

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

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

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

Цель лабораторной работы

Определить давление в жидкости по показаниям пьезометра, разность давлений в двух точках жидкости по показаниям дифференциального манометра и величину вакуума по показаниям вакуумметра.

Описание установки

На рис 2.1 а приведена схема жидкостного манометра в виде открытой стеклянной трубки, называемой пьезометром, присоединённого к закрытому стеклянному резервуару. В пьезометр наливают рабочую жидкость (вода, масло и др.), который показывает избыточное или манометрическое давление $p_{изб.} = \rho g h$ в месте присоединения трубки.

Высота в пьезометре $h = \frac{p}{\rho g}$ называется пьезометрической высотой или пьезометрическим напором.

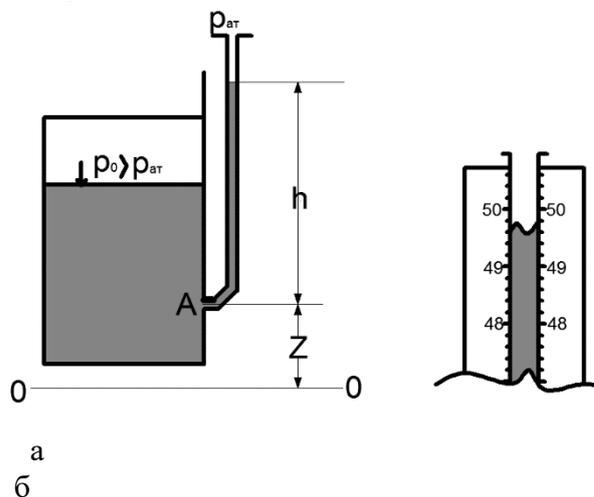


Рис.2.1 Схема жидкостного манометра

Сумму двух напоров - геометрического и пьезометрического $z + \frac{p}{\rho g}$ называют гидростатическим напором. Согласно уравнению гидростатики величина гидростатического напора в любых точках однородной покоящейся жидкости одинакова.

При измерении давлений отсчёты производятся по миллиметровой шкале на уровне центра мениска в пьезометрической трубке (рис. 2.1 б). Для более точного определения уровня воды применяется мерная игла (шпитценмасштаб), снабжённая измерительной шкалой с нониусом, по которому можно делать отсчёты с точностью до 0,1 мм.

Дифференциальный манометр (рис. 2.2) измеряет разность давлений в двух точках, в которых он присоединён. Рабочая жидкость в колене дифференциального манометра имеет плотность ρ_2 отличную от плотности жидкости ρ_1 , в которой измеряется давление (в соответствии со схемой $\rho_2 > \rho_1$).

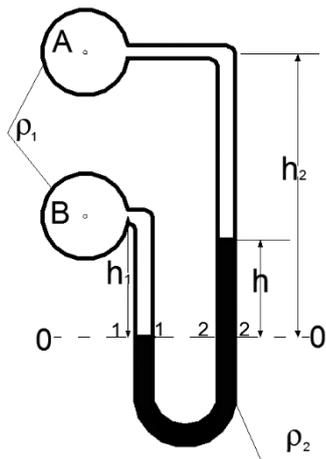


Рис.2.2 Схема дифференциального манометра

В сечениях 1-1 и 2-2 коленчатой трубки манометра давления одинаковы, так как эти сечения расположены в горизонтальной плоскости в однородной жидкости:

$$p_B = \rho_1 g h_1 = p_A + \rho_1 g (h_2 - h_1) + \rho_2 g h$$

$$p_B - p_A = h(\rho_2 g - \rho_1 g) + \rho_1 g (h_2 - h_1)$$

На рис. 2.3 показана схема вакуумметра, который представляет собой стеклянную трубку, опущенную в сосуд с жидкостью, находящейся под атмосферным давлением.

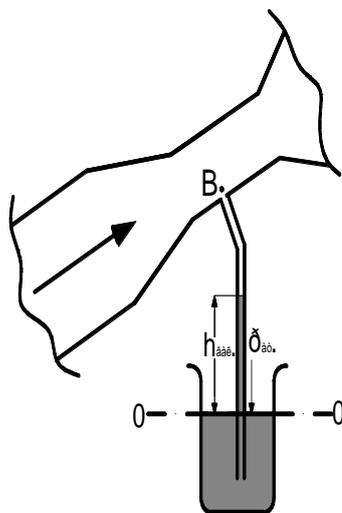


Рис.2.3 Схема вакуумметра

Трубка вакуумметра присоединена к исследуемой области потока в точке В. Если в этой точке давление меньше атмосферного, то жидкость в трубке описанного вакуумметра поднимется на высоту $h_{\text{вак.}}$.

На плоскости 0-0 как внутри вакуумметра, так и снаружи, давления одинаковы, так как это горизонтальная плоскость в однородной покоящейся жидкости. Следовательно,

$$p_{\text{атм.}} = p_B + \rho g h_{\text{вак.}} \text{ или } p_B = p_{\text{атм.}} - \rho g h_{\text{вак.}}$$

Порядок выполнения работы

Для определения давления в жидкости пьезометром делаются два отсчёта по шкале: один на уровне мениска пьезометра, другой на уровне присоединения пьезометра в точке, где измеряется давление.

Разность отсчётов h , умноженная на ρg жидкости в пьезометре, даст искомое давление.

Для определения разности давлений в двух точках дифференциальным манометром измеряются уровни рабочей жидкости в левом и правом коленах трубки и по разности отсчётов находится разность давлений Δp . Плотности рабочей жидкости, в которой измеряется давление, должны быть известны.

Для измерения вакуума один конец трубки прибора следует присоединить к области, в которой давление меньше атмосферного, другой конец трубки опустить в сосуд с водой. При наличии разряжения в исследуемой области вода поднимется по трубке на высоту $h_{\text{вак.}}$. Недостаток до атмосферного давления будет $\rho g h_{\text{вак.}}$ (где ρ -плотность жидкости в сосуде). А полное давление $p_{\text{полн.}}$ в исследуемой области будет $p = p_{\text{атм.}} - \rho g h_{\text{вак.}}$.

Порядок обработки результатов

Кроме измеренных величин, используют следующие исходные данные: атмосферное давление $p_{\text{атм.}} = 10^5$ Па; плотность воды $\rho = 1000$ [кг/м³]; плотность другой рабочей жидкости; ускорение свободного падения $g = 9.81$ [м/с²].

Вычисляют: Разность отметок уровня воды в пьезометре и точке присоединения пьезометра. Разность отметок умноженная на ρg жидкости в пьезометре даёт избыточное давление.

Для определения разности давлений в двух точках дифференциальным манометром измеряют уровни жидкости в левом и правом коленах трубки и по разности отсчётов находится разность давлений $p_B - p_A = h(\rho_2 g - \rho_1 g) + \rho_1 g(h_2 - h_1)$.

Для определения величины $p_{\text{вак.}} = \rho g h_{\text{вак.}}$ определяется высота жидкости в вакууметре.

Контрольные вопросы

1. Если высота столба воды в пьезометре $h = 70$ см, как выразить это давление в Па, [кг/см²], атмосферах?
2. От чего зависит величина гидростатического давления- полного, избыточного, давления при вакууме?

Таблица 2.1

№	Показатели	Ед. изм.	Величина
---	------------	----------	----------

п/п			
Измерение давления пьезометром			
1	Отметка уровня воды в пьезометре	см	
2	Отметка точки присоединения пьезометра	см	
3	Разность отметок h	см	
4	Плотность жидкости ρ	кг/м ³	
5	Избыточное давление в точке	Па	
Измерение разности давления в двух точках дифференциальным манометром			
6	Отметка уровня в левом колене манометра	см	
7	Отметка уровня в правом колене манометра	см	
8	Разность отметок h	см	
9	Плотность рабочей жидкости ρ ₁	кг/м ³	
10	Плотность жидкости, где измеряется давление ρ ₂	кг/м ³	
11	Разность давлений в точках $p_B - p_A = h(\rho_2 g - \rho_1 g) + \rho_1 g(h_2 - h_1)$	Па	
Измерение величины вакуума			
12	Высота жидкости в вакуумметре h _{вак.}	см	
13	Плотность жидкости ρ	кг/м ³	
14	Вакуумметрическое давление ρ g h _{вак.}	Па	

2.2. ИЗМЕРЕНИЕ МЕСТНЫХ СКОРОСТЕЙ ПОТОКА ТРУБКОЙ ПИТО-РЕБОКА

Общие сведения

В лабораторных условиях наиболее распространённым прибором для измерения местных скоростей движения жидкости является трубка Пито - Ребока.

Принцип действия трубки, простейшая схема которой показана на рис.2.4, можно объяснить, применив уравнение Бернулли для струйки жидкости. В сечении 1-1, совпадающем с плоскостью обреза трубки, загнутой навстречу потоку, удельная энергия частицы жидкости, движущейся со скоростью u, будет:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} \quad (2.4)$$

Приняв плоскость сравнения по оси горизонтального участка трубки и высоту давления $\frac{p}{\rho g}$, определяемую по показаниям другой трубки, установленной рядом с отверстием на уровне той же оси, получим удельную энергию частицы в сечении 1-1 $\frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g}$.

Назовём трубки первую и вторую соответственно динамической и статической.

В сечении 2-2 на уровне жидкости в динамической трубке удельная энергия частицы выразится через z , так как избыточное давление здесь $\frac{p}{\rho g} = 0$ и $u = 0$.

Для сечений 1-1 и 2-2 получим:

$$H = \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} \quad \text{или}$$

$$\frac{u^2}{2g} = H - \frac{p}{\rho g} = h$$

$$u = \sqrt{2gh}$$

т.е. скоростной напор равен разности показаний динамической и статической трубок. Скорость в месте установки трубки будет

С учётом вязкости жидкости и конструктивных особенностей трубки скорость будет равна:

$$u = k\sqrt{2gh}, \quad (2.5)$$

где k - коэффициент, определяемый тарированием трубки. Обычно при измерении скоростей в воде $k = 1-1.04$.

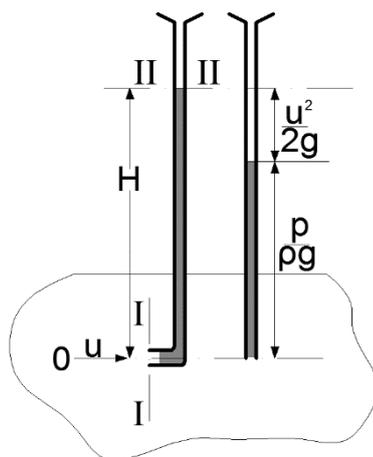


Рис.2.4 Схема действия скоростной трубки

Цель лабораторной работы

Измерить скорости в открытом потоке трубкой Пито- Ребока и сопоставить их с данными измерений другим способом.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой лоток с движущейся жидкостью, в которую вводится трубка Пито – Ребока, имеющая L образную форму, нижний конец которой направлен навстречу потока.

Порядок выполнения работы

Для подготовки трубки к работе ее следует зарядить, поместив конец трубки в бачок с водой (лучше кипячёной, не содержащей воздушных пузырьков).

Затем через верхнее отверстие манометра надо удалить воздух из трубок пока вода не поднимется по ним примерно до измерительной шкалы. После этого отверстие манометра надо закрыть, следя за тем, чтобы при закрывании отверстия, вода в трубках не опускалась. Через некоторое время уровни воды в трубках должны установиться одинаковыми. Если уровни не выравниваются, значит в трубках есть пузырьки воздуха и их надо удалить.

Трубка вводится в поток (вместе с бачком), затем бачок вынимается так, чтобы при этом трубка не оказалась над водой, иначе в неё попадёт воздух.

Трубка устанавливается в намеченной точке навстречу потоку, и после стабилизации уровней в динамической и статической трубках по шкале определяется их разность. Отсчёты следует делать на уровне мениска в трубке.

При наличии подвижного зеркального визира волосок на зеркале перед отсчётом следует совмещать с центром мениска.

После снятия отсчётов трубка передвигается в следующую намеченную точку потока.

Скорость вблизи поверхности потока измеряется трубкой таким образом, чтобы горизонтальный конец трубки не выступал над поверхностью воды, иначе в трубку попадёт воздух и ее показания будут неправильными.

Скорости, измеренные трубкой Пито- Ребока можно сопоставить, например, с поверхностными скоростями потока, измеренными поплавками. Для этого наметить двумя створами участок лотка длиной $l = 1,5-1,0$ м, посередине которого измерялась скорость трубкой и секундомером измерить время t прохождения поплавка через намеченные створы. Поверхностная скорость будет:

$$u_{\text{пов.}} = \frac{l}{t}.$$

Следует заметить, что при правильной работе с трубкой ее показания скоростей будут точнее, чем измеренные поплавками, вследствие относительной погрешности измерения времени при коротком участке между створами и осреднения скорости в пределах этого участка.

Порядок обработки результатов

По шкале определяется уровень жидкости в динамической и статической трубках. Разности уровней жидкости в этих трубках - скоростной напор.

Местная скорость на оси трубы $u = k\sqrt{2gh}$.

Контрольные вопросы

1. Почему в динамической трубке наблюдаются колебания уровней жидкости?
2. Если скорость в потоке $u = 10 \text{ см/с}$, то чему равна разность H показания трубок при $k = 1$?
3. Какую предельно минимальную скорость можно измерять трубкой Пито - Ребока при точности отсчёта по шкале манометра 1 мм?

Таблица 2.2

Показатели	Ед. изм.	№ точек		
		1	2	3
Высота установки трубки	см			
Показания динамической трубка	см			
Показания статической трубка	см			
Скоростной напор, $u^2/2g$	см			
Местная скорость, u	см/с			

Измерение скоростей поплавками

Расстояние между створами l , см

Время прохождения поплавка t , сек

Поверхностная скорость $u_{\text{пов}} = l/t$, см/сек

2.3. ДЕМОНСТРАЦИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ И ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИЙ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Общие сведения

Уравнение Бернулли для потока при установившемся равномерном или плавно изменяющемся движении вязкой жидкости для двух сечений 1-1 и 2-2 имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_{\text{тр}} \quad (2.6)$$

Интерпретируя уравнение с геометрической позиции видим, что обе части представляют сумму высот имеющих линейную размерность:

z - высота положения выбранной точки в живом сечении потока над плоскостью сравнения, м;

$\frac{p}{\rho g}$ - высота, соответствующая давлению в выбранной точке

(пьезометрическая высота), м;

$z + \frac{p}{\rho g}$ - гидростатический напор, м.

$\frac{\alpha v^2}{2g}$ - скоростная высота или скоростной напор, где α - коэффициент

Кориолиса, характеризующий неравномерность распределения местных скоростей u по живому сечению потока, м.

$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$ гидродинамический напор, м.

Сечение 2-2 должно быть расположено ниже по течению по сравнению с сечением 1-1. Положение горизонтальной плоскости сравнения назначают произвольно. От этой плоскости отсчитывают вертикальные координаты точек расчетных сечений. Обычно стремятся к тому, чтобы эти координаты не были отрицательными.

Отнесённые к единице массы потока в единицу времени, члены уравнения Бернулли энергетически будут представлять:

$z + \frac{p}{\rho g}$ - удельную потенциальную энергию;

$\frac{\alpha v^2}{2g}$ - удельную кинетическую энергию;

$h_{тр}$ - удельную энергию на преодоление сопротивлений (трения) между выбранными сечениями.

Сумма удельной потенциальной энергии и удельной кинетической составляет полную удельную энергию.

Таким образом, уравнение Бернулли является выражением закона сохранения энергии в потоке жидкости.

Если на участке потока уменьшается скорость (кинетическая энергия), то согласно уравнению Бернулли на этом участке должно соответственно возрасти давление (потенциальная энергия).

Цель лабораторной работы

На напорном трубопроводе переменного сечения проследить по приборам потери напора на сопротивления, переход энергии в потоке из потенциальной в кинетическую и обратно в соответствии с уравнением Бернулли.

По опытным данным построить линию пьезометрического напора $z + \frac{p}{\rho g}$ и линию гидравлического напора $z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$ - полной удельной энергии для целого потока.

Описание лабораторной установки

Основная часть установки (рис.2.5) представляет собой напорную трубу 7 переменного по длине сечения. В трубу вода поступает из напорного бака 2. В напорный бак 2 она подаётся насосом из бассейна. Расход регулируют задвижкой 1. Уровень воды в баке 2 поддерживают постоянным. Из трубы 7 вода поступает в другой бак 6. Уровень воды в баке 6 остаётся постоянным из-за сброса ее через его стенку. Для измерения расхода объёмным способом под струю воды выдвигают направляющий лоток, и вода поступает в мерный бак. Время заполнения мерного бака измеряют секундомером.

В характерных сечениях трубы 7 установлены несколько пар трубок Пито. В каждой паре одна трубка 3 загнута навстречу потоку и измеряет гидродинамический напор в точке без учета атмосферного давления (динамическая трубка). Другая трубка 4 измеряет пьезометрический напор (статическая трубка). При переходе воды из широкого сечения в узкое давление

уменьшается и снова увеличивается при переходе из узкого сечения в широкое. При уменьшении давления скоростной напор возрастает.

Все трубки и баки снабжают шкалой отсчёта с нулём на одной горизонтальной плоскости.

Внутренние диаметры трубы Γ или площади сечений, где устанавливаются пьезометры, а также расстояния между сечениями указывают на схеме.

Порядок выполнения работы

Устанавливают постоянный расход и постоянные уровни воды в баках. В лабораторный журнал записывают указанные на схеме установки площади сечений и расстояния между сечениями. Расход определяют объёмным способом - измеряют секундомером время наполнения мерного бака t объёмом W . Значения записывают в журнал. Измеряют уровни воды в баках.

По показаниям статических трубок в лабораторный журнал записывается пьезометрический напор, а по показаниям динамических трубок – гидродинамический напор.

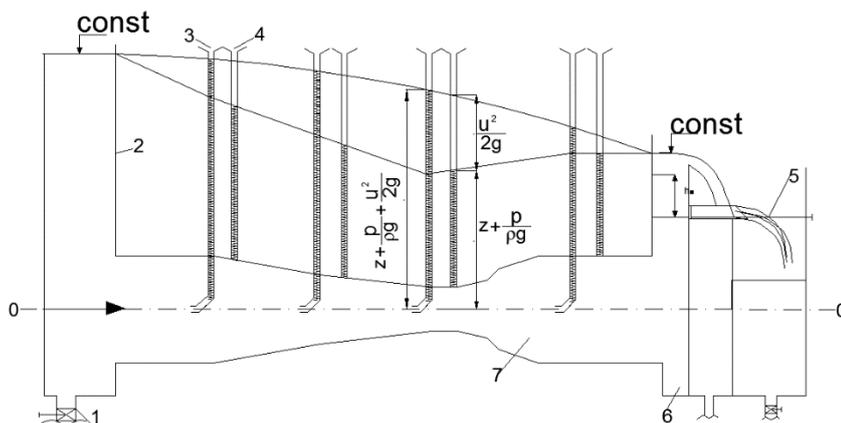


Рис.2.5 Схема лабораторной установки для изучения уравнения Бернулли: 1- задвижка; 2,6 - баки; 3, 4 - динамические и статические трубки; 5 - устройство для измерения расхода; 7- труба.

Порядок обработки результатов

Скоростной напор определится как разность между показаниями динамической и статической трубок. По скоростному напору находится величина скорости $u = \sqrt{2gE_{кин}}$ осевой струйки потока, где расположены открытые концы динамических трубок. Для определения удельной энергии всего потока надо определить скоростной напор $\frac{\alpha v^2}{2g}$, вычисленный по средней скорости $v = \frac{Q}{\omega}$ с учётом α (при расчётах можно принять $\alpha = 1,05-1,10$). Средние скорости v в сечениях трубы определяются по расходу $Q = \frac{W}{t}$.

Потери энергии между сечениями определяются как разность $h_{тр} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right)$.

По полученным значениям $z + \frac{p}{\rho g}$ на миллиметровке строится пьезометрическая линия и по значениям $z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$ линию полной удельной энергии потока. На горизонтальной оси в выбранном масштабе откладывают расстояния от напорного бака до каждого сечения, а в каждом сечении вертикально вверх - соответствующие значения пьезометрического напора в выбранном для напоров масштабе, соединяя полученные точки, строят пьезометрическую линию (линию потенциальной удельной энергии). В тех же сечениях откладывают вертикально вверх от горизонтальной оси значения гидродинамического напора и строят напорную линию (линию полной удельной энергии).

Контрольные вопросы

1. Каковы условия применения уравнения Бернулли?
2. Какие члены уравнения Бернулли соответствуют потенциальной удельной энергии, кинетической удельной энергии?
3. Как записывается уравнение Бернулли для невязкой жидкости? Как при этом проходит напорная линия?
4. Как определить потери напора между любыми двумя сечениями по чертежу?
5. На чертеже покажите гидравлический и пьезометрический уклоны.
6. Чему равно расстояние по вертикали между напорной и пьезометрической линиями? При каком условии они параллельны?

Таблица 2.3

Показатели	Ед. изм.	УВБ	№№ сечений					УНБ
			1	2	3	4	5	
Высота над плоскостью сравнения, z	см							
Площадь сечений трубы, ω	см ²							
Показания статических трубок	см							

Показатели	Ед. изм.	УВБ	№№ сечений					УНБ
			1	2	3	4	5	
Показания динамических трубок	см							
Скоростной напор, $u^2/2g$	см							
Местная скорость, $u = \sqrt{2gE_{кин.}}$	см/с							
Объем воды в мерном баке, W	см ³							
Время наполнения мерного бака, t	с							
Расход, $Q = W/t$	см ³ /с							
Средняя скорость, v	см/с							
Скоростной напор по средней скорости, $\alpha v^2/2g$	см							
Гидродинамический напор, H	см							
Потери напора, $h_{тр}$	см							
Расстояния сечений от входа, l	см							

2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВОДОМЕРА ВЕНТУРИ

Общие сведения

Водомер Вентури применяется для измерения расхода воды в напорном трубопроводе.

Действие водомера основано на законе сохранения энергии при движении жидкости, выражаемом уравнением Бернулли.

В водомере при переходе жидкости из широкого сечения в узкое увеличивается скорость v и соответственно уменьшается давление $\frac{p}{\rho g}$, что

отражается показаниями пьезометров, присоединённых к широкой части водомера и горловине (рис.2.6).

Изменение пьезометрического напора будет

$$h = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right), \quad (2.7)$$

Расход жидкости Q постоянный. По уравнению неразрывности $Q = v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2$, т.е. скорости обратно пропорциональны живым сечениям:

$$v_1 = v_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (2.8)$$

Для сечений 1-1 и 2-2 при произвольно выбранной плоскости сравнения 0-0 уравнение Бернулли запишется

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_{тр}$$

Вводя в уравнение разность пьезометрических напоров h и выразив скорость v_1 через v_2 имеем: $h = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \frac{\alpha v_2^2}{2g} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + h_{тр}$

Принимая приближённо $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ и не учитывая потери, получаем выражение скорости $v_2 = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2}}$ и расхода без учёта потерь

$$Q = \omega_2 v_2 = \omega_2 \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2}} \sqrt{h} = A \sqrt{h} \quad (2.9)$$

Величина $A = \omega_2 \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2}}$ зависит от соотношения диаметров широкой и узкой частей и называется постоянной водомера.

Фактический расход Q_ϕ через водомер с учётом потерь напора $h_{тр}$ на сопротивление при движении воды из широкой части в горловину будет меньше, чем расход $Q = A \sqrt{h}$, полученный без учёта потерь $Q_\phi = \mu A \sqrt{h}$,
(2.10)

где μ – коэффициент расхода водомера.

Если фактический расход в трубопроводе Q_ϕ измерить каким-либо способом, например, объёмным, то можно определить коэффициент расхода водомера

$$\mu = \frac{Q_\phi}{A \sqrt{h}} \quad (2.11)$$

Цель лабораторной работы

Определить коэффициент расхода водомера Вентури при различных расходах воды.

Описание лабораторной установки

Водомер Вентури представляет собой короткую трубу переменного сечения, вставленную в трубопровод, а также присоединённых к широкой части и горловине водомера пьезометров.

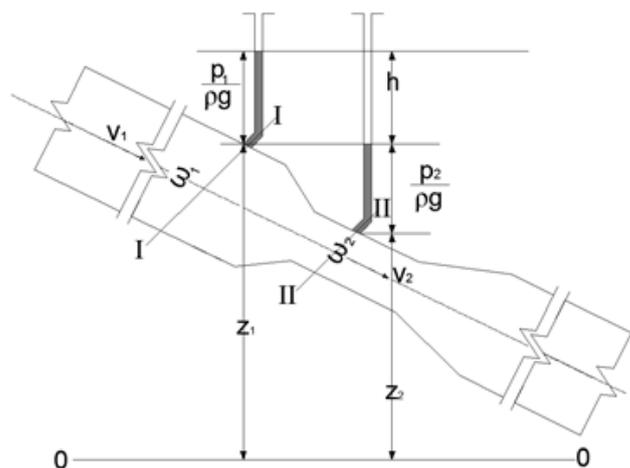


Рис. 2.6 Схема водомера Вентури

Порядок выполнения работы

Вычисляется предварительно постоянная водомера A при внутренних диаметрах d_1 и d_2 . Следует при этом обратить внимание, что величина A размерная.

Затем при некотором открытии задвижки на напорном трубопроводе, после того как уровни воды в пьезометрах водомера установятся, по ним делаются отсчёты и вычисляется разность h . Измеряется фактический расход объёмным способом ($Q = \frac{W}{t}$, где W - объём мерного бака, t - время его наполнения).

Изменяя несколько раз открытие задвижки, т.е. изменяя расход, и повторяя при каждом открытии все последующие измерения и вычисления, получают соответствующие значения коэффициента расхода μ .

Опыты проводятся при квадратичной области сопротивления в трубопроводе, характеризуемой числом $Re > Re_{кв}$

При тщательном проведении опытов и внимательном вычислении полученные значения μ будут близкими между собой, так как в области квадратичного сопротивления практически $\mu = \text{const}$ для данного водомера. Окончательная величина μ выводится как арифметически среднее из полученных значений μ_i .

Порядок обработки результатов

Определяется разность показаний 1-го и 2-го пьезометров $h = p_1/\rho g - p_2/\rho g$. Объёмным способом определяется расход воды $Q = W/t$ и по полученным данным определяется коэффициент расхода водомера.

Контрольные вопросы

1. Как изменится расход, если разность показаний пьезометров увеличится в два раза?
2. Если бы данный расход пошёл через водомер в обратном направлении, какие уровни были бы при этом в пьезометрах?
3. На преодоление каких сопротивлений затрачивается напор $h_{тр}$ между выбранными сечениями в водомере?

Таблица 2.4

№№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Опыты		
			1-ый	2-ой	3-ий
1	Диаметр широкой части трубы, d_1	см			
2	Площадь сечения, ω_1	см ²			
3	Диаметр горловины водомера, d_2	см			
4	Площадь сечения, ω_2	см ²			
5	Показания 1-го пьезометра, $p_1/\rho g$	см			
6	Показания 2-го пьезометра, $p_2/\rho g$	см			
7	Разность показаний, $h = p_1/\rho g - p_2/\rho g$	см			
8	Объем воды в мерном баке, W	см ³			
9	Время, t	с			
10	Расход, $Q = W/t$	см ³ /с			
11	Постоянная водомера, A	с/см ^{2,5}			
12	Расход без учёта потерь, $A\sqrt{h}$	см ³ /с			
13	Коэффициент расхода, μ				
14	Средний коэффициент расхода, μ_{cp}				

2.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ТРУБАХ

Общие сведения

Потери удельной энергии (напора) $h_{тр}$, затрачиваемой на преодоление сопротивлений движению вязкой жидкости, слагаются из потерь двух видов: потери напора по длине $h_{дл}$, местных потерь напора h_m .

Местные потери напора связаны с преодолением гидравлических сопротивлений в напорных трубах (вход, выход, расширение, сужение, поворот, кран, диафрагмы и т. д.) и в большинстве случаев определяются с помощью коэффициентов, полученных опытным путём.

Экспериментальное определение коэффициента местного сопротивления связано с применением уравнения Бернулли для двух сечений: до местного сопротивления 1-1 и после него 2-2

$$h_{тр} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) \quad (2.12)$$

Величину $z + \frac{p}{\rho g}$ можно определить по показанию пьезометра,

установленного в сечении, величину скоростного напора $\frac{\alpha v^2}{2g}$ можно вычислить

по средней скорости в том же сечении. Пьезометры устанавливаются в сечениях с равномерным или плавно изменяющимся движением, то есть на расстоянии от входа в трубу и от гидравлических сопротивлений. Значение $h_{тр}$ включает не только местные потери напора, но и потери по длине на участке между пьезометрами. Но на коротких участках из-за малого значения $h_{дл}$ практически считают $h_{тр} = h_{м}$.

При расчётах потери напора и в том числе местные выражаются в долях скоростного напора

$$h_{м} = \zeta_{м} \frac{v^2}{2g}, \quad (2.13)$$

где $\zeta_{м}$ - коэффициент сопротивления для данного местного сопротивления.

Коэффициент сопротивления в общем случае зависит от числа Рейнольдса. В турбулентных потоках при значениях $Re > 5 \cdot (10^3 \dots 10^4)$ влияние числа Рейнольдса незначительно.

В некоторых случаях, например при внезапном расширении трубы, коэффициент $\zeta_{м}$ можно получить аналитически. Но в большинстве случаев коэффициент $\zeta_{м}$ определяют опытным путем для каждого вида сопротивления. Числовые значения коэффициентов местных сопротивлений $\zeta_{м}$ можно найти в литературе [1].

Если гидравлическое сопротивление, например кран (рис.2.7 а), расположен на горизонтальном участке трубопровода постоянного сечения, то потери напора будут равны разности показаний пьезометров, установленных по обе стороны крана на расстоянии l .

$$h_{м} = \left(\frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} \right),$$

так как $z_1 = z_2$ и скоростные напоры одинаковы.

Пьезометры измеряют избыточное, а не абсолютное давление. Однако при вычитании значение $\frac{p_{ат}}{\rho g}$ сокращается.

В случае негоризонтального положения трубы (рис.2.8 б) выражение потерь не изменится

$$h_{тр} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right)$$

При внезапном сужении или расширении трубопровода (рис.2.8) разность показаний пьезометров уже не будет представлять потери напора, так как в широком и узком сечениях трубы скорости различны по величине. В этом случае потери напора будут выражаться из уравнения Бернулли (2.12).

Цель лабораторной работы

Экспериментально определить величины коэффициентов местных сопротивлений в напорном трубопроводе при турбулентном режиме движения жидкости и сравнить полученные значения с данными, приведёнными в справочниках.

Описание лабораторной установки

Для проведения работы можно использовать установку с трубопроводом, на котором в зависимости от возможностей лаборатории размещены одно или несколько местных сопротивлений.

Из напорного бака или бассейна вода должна поступать в трубопровод. Расход Q регулируется задвижками, а на выходе из трубопровода измеряется объёмным способом. Местное сопротивление может находиться на трубопроводе постоянного диаметра (рис.2.7 а и б). Для изучения плавного или резкого сужения или расширения трубопровод монтируют из труб разного диаметра (рис.2.8 а и б).

Размеры установки подбирают так, чтобы обеспечить в опытах турбулентный режим движения с большими числами Рейнольдса. Тогда влиянием Re на коэффициенты сопротивлений ζ_m можно пренебречь.

Пьезометры должны быть удалены от задвижек и подключены к трубопроводу в сечениях до гидравлического сопротивления и после него и выведены на щит со шкалой. Отсчёты по шкале удобно брать от оси трубы, а ось труб лучше располагать в одной горизонтальной плоскости. Тогда $z = 0$. Измеряются также и внутренние диаметры труб, размеры которых указываются на схеме установки. Температуру воды определяют термометром.

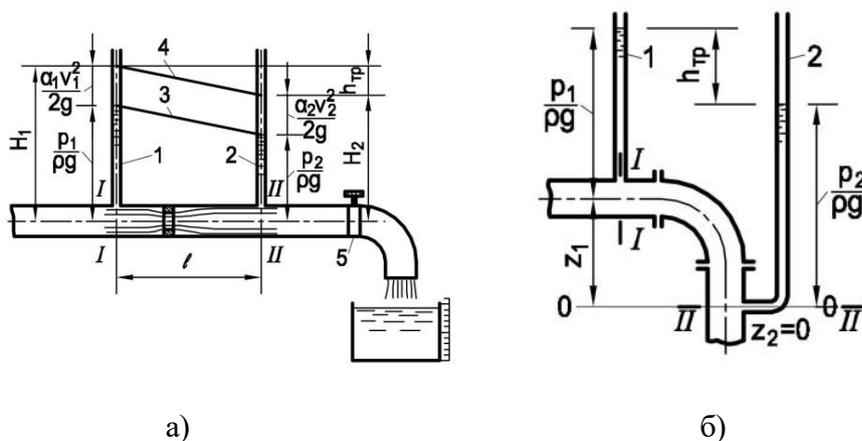


Рис.2.7 Схема лабораторной установки для определения местных потерь напора:

1, 2 - пьезометры; 3 и 4 - пьезометрическая и напорная линии;
5-вентиль

Порядок выполнения работы

Перед началом опытов включают насос и воду подают к установке. С помощью задвижки пропускают постоянный расход, который определяют объёмным способом, измеряя t - время наполнения мерного бака объёмом W .

Измеряют температуру воды T . Снимают показания первого $\left(\frac{p_1}{\rho g}\right)$ и второго $\left(\frac{p_2}{\rho g}\right)$ пьезометров около каждого гидравлического сопротивления. Для негоризонтального трубопровода измеряется расстояние z по вертикали между центрами сечений (рис. 2.8 б). Результаты измерений записывают в лабораторный журнал (табл.2.5).

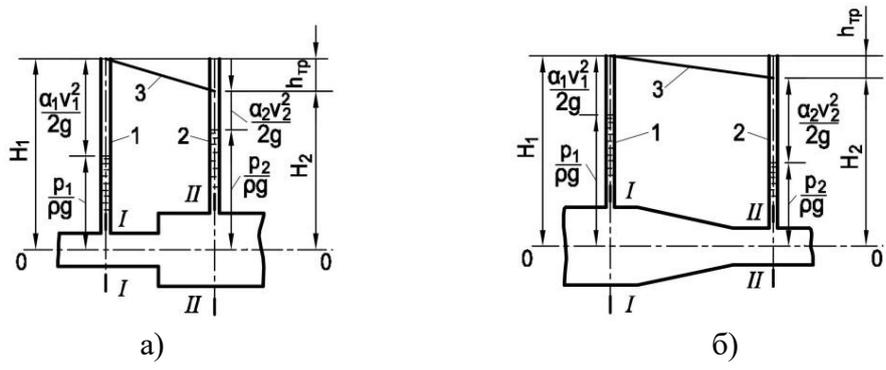


Рис.2.8 Схема внезапного расширения и плавного сужения:
 1, 2 - пьезометры; 3 - напорная линия

Порядок обработки результатов

Для диафрагмы, колена, крана по пьезометрам определяется разность показаний $h = \left(\frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} \right)$, которая в этих случаях будет

$$h = h_{\text{тр}} = h_{\text{м}} = \zeta_{\text{м}} \frac{v^2}{2g}.$$

Отсюда определяется коэффициент местного сопротивления

$$\zeta_{\text{м}} = \frac{h}{v^2/2g},$$

где v - средняя скорость в трубе.

Для исследования потерь напора при внезапном сужении трубы надо предварительно вычислить площади живых сечений $\omega_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$, $\omega_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$ и

определить средние скорости течения воды до и после сопротивления $v_1 = \frac{Q}{\omega_1}$,

$v_2 = \frac{Q}{\omega_2}$. По показаниям пьезометров и вычисленным скоростным напорам в

сечениях $\frac{\alpha v_1^2}{2g}$, $\frac{\alpha v_2^2}{2g}$ (при $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$) определяются потери

$$h_{\text{в.с}} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right).$$

Выражая потери при внезапном сужении в долях скоростного напора за сужением $\frac{\alpha v_2^2}{2g}$, получаем $h_{\text{в.с}} = \zeta_{\text{в.с}} \frac{v_2^2}{2g}$, откуда значение коэффициента

внезапного сужения равно $\zeta_{\text{в.с}} = \frac{h_{\text{в.с}}}{v_2^2/2g}$. Следует сравнить полученное значение с

данными в справочнике для соотношения площадей $\frac{\omega_2}{\omega_1}$.

Для определения коэффициента потерь при внезапном расширении трубопровода находятся площади ω_1, ω_2 , скорости v_1, v_2 , показания пьезометров

перед внезапным расширением и за ним. $\left(\frac{p_1}{\rho g} \right)$, $\left(\frac{p_2}{\rho g} \right)$. Потери напора будут

равны разности полных удельных энергий в сечениях

$$h_{\text{в.р}} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right).$$

В долях скоростного напора (за расширением) потери могут быть выражены как $h_{\text{в.р}} = \zeta_{\text{в.р}} \frac{v_2^2}{2g}$. Отсюда опытное значение коэффициента

$$\zeta_{\text{в.р}} = \frac{h_{\text{в.р}}}{v_2^2/2g}.$$

Для случая внезапного расширения местные потери напора можно выразить аналитически $h_{в.р} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$. Если выразить скорость v_1 через v_2 , согласно

уравнению неразрывности $v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2$, то получим $h_{в.р} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2 \frac{v_2^2}{2g} = \zeta_{в.р} \frac{v_2^2}{2g}$.

Полученный из опыта коэффициент $\zeta_{в.р} = \frac{h_{в.р}}{v_2^2/2g}$ следует сравнить с теоретическим значением $\zeta_{в.р} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2$.

Кинематическая вязкость определяется в зависимости от измеренной температуры воды по табл.1.1. Число Рейнольдса $Re = \frac{v d}{\nu}$. Если полученное значение $Re > 5 \cdot (10^3 \dots 10^4)$, то можно считать, что коэффициент местного сопротивления не зависит от значений Re .

Контрольные вопросы

1. Назовите виды потерь напора.
2. По какой формуле вычисляют местные потери напора?
3. От чего зависит коэффициент местных сопротивлений?
4. Представляет ли разность показаний пьезометров потери напора, если происходит расширение или сужение трубы?
5. Почему в случаях, приведённых на рис. 2.7 а и б, для определения потерь напора не надо знать скорость?

Таблица. 2.5

№	Показатели	Единицы измерения	Сечение	
			1-1	2-2
1	Объем воды в мерном баке, W	см ³		
2	Время, t	с		
3	Расход, Q = W/t	см ³ /с		
4	Вид сопротивления			
5	Внутренний диаметр трубы, d	см		
5	Площадь живого сечения, ω	см ²		
7	Средняя скорость течения воды в сечениях, $v = Q/\omega$	см/с		
8	Скоростной напор, $\omega v^2/2g$	см		
9	Показания пьезометров p/pg	см		
10	Расстояние по вертикали между центрами сечений, z	см		
11	Потери напора, $h_{тр}$	см		
12	Коэффициент местного сопротивления из опыта, ζ_m			
13	Температура воды, T	°C		
14	Кинематическая вязкость, ν	см ² /с		

15	Число Рейнольдса, $Re = vd/\nu$			
16	Коэффициент сопротивления по справочнику, ζ_m			
17	Относительное расхождение	%		

2.6. ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Общие сведения

При движении вязкой жидкости могут существовать два режима движения: ламинарный и турбулентный. Ламинарным называется режим, при котором струйки жидкости в потоке не перемешиваются между собой, двигаясь слоями. При турбулентном режиме слоистость движения жидкости нарушена, так как появляется пульсация скорости (изменение вектора местной скорости во времени), вызывающая перемешивание частиц жидкости.

Чтобы в расчётах выяснить режим движения жидкости, надо определить число Рейнольдса и сравнить его с критическим значением. Числом Рейнольдса называется безразмерный комплекс, составленный из размерных величин: скорости, характерного линейного размера живого сечения и вязкости. Для напорной трубы круглого сечения число Рейнольдса

$$Re = \frac{Vd}{\nu}, \quad (2.14)$$

где V – средняя скорость движения жидкости в живом сечении; d – диаметр трубы; ν – кинематическая вязкость жидкости.

Число Рейнольдса, при котором происходит переход из одного режима в другой, называется критическим $Re_{кр}$. Для круглых напорных труб критическое число Рейнольдса по диаметру $Re_{кр} = 2320$. При $Re < Re_{кр}$ наблюдается ламинарный режим движения, при $Re > Re_{кр}$ – турбулентный.

Цель лабораторной работы

Экспериментальное изучение режимов движения жидкости.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из напорного бака и присоединённой к нему напорной трубой с краном на конце (рис.2.9). Над напорным баком помещается небольшой бачок с подкрашенной жидкостью, которая по тонкой трубке, снабжённой краном, поступает во входной участок трубы. На выходе из трубы устанавливается мерный бак для измерения расхода объёмным способом. Время наполнения мерного бака измеряют секундомером. Для измерения температуры воды используют переносной или закреплённый в напорном баке термометр.

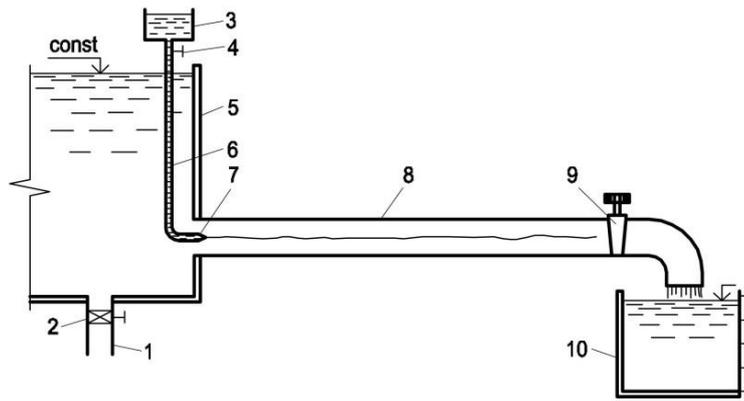


Рис.2.9 Схема лабораторной установки для изучения режимов движения жидкости:

1-питающая линия; 2,9- винтили; 3- бачок для окрашенной жидкости; 4- кран; 5и10- напорный и мерный баки; 6- тонкая трубка; 7- насадок; 8- прозрачная труба.

Порядок выполнения работы

В лабораторный журнал записывают диаметр трубы d . Напорный бак заполняется водой до заданной отметки. Сначала открывается кран на трубе для пропуска небольшого расхода воды. При малых скоростях движения воды в трубе вводимая в поток краска не будет перемешиваться с окружающей водой, что укажет на наличие ламинарного режима. Измеряют температуру воды T , объем воды в мерном баке W и время его наполнения t .

Увеличивая открытие крана и наблюдая за поведением струйки краски в потоке воды, можно уловить переходное состояние потока от ламинарного режима к турбулентному. При этом следует повторить все измерения.

При последующем открытии крана будет наблюдаться устойчивый турбулентный режим с интенсивным перемешиванием краски с водой. При турбулентном режиме движения также измеряют расход и температуру воды. Во время опытов нужно поддерживать постоянный уровень воды в напорном баке.

Так как диаметр трубы во всех опытах остается постоянным, а вязкость воды из-за изменения температуры меняется незначительно, то смена режимов движения обусловлена в основном изменением средней скорости.

Порядок обработки результатов

Для всех опытов вычисляют: площадь живого сечения $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$; расход воды $Q = \frac{W}{t}$; среднюю скорость течения воды в живом сечении $V = \frac{Q}{\omega}$; число Рейнольдса $Re = \frac{Vd}{\nu}$.

Кинематическую вязкость для воды ν определяют в зависимости от измеренной температуры T по таблице 1.1.

Полученные в опытах значения чисел Рейнольдса сравнивают с числом $Re_{кр}$. Делают вывод о режиме движения жидкости и сравнивают с результатами визуальных наблюдений.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается отличие ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости?
2. Какой критерий служит характеристикой режимов движения?
3. Какое число Рейнольдса принимают за критическое?
4. Как в расчётах определить режим движения жидкости?
5. При движении воды или при движении нефти раньше возникнет турбулентный режим с увеличением скорости в трубе диаметром d ?

Таблица 2.6

№ п/п	Наименование	Един. измер.	Опыты		
			1	2	3
1	Диаметр трубы, d	см			
2	Площадь сечения трубы, ω	см ²			
3	Объем воды в мерном баке, W	см ³			
4	Время наполнения мерного бака, t	с			
5	Расход воды, Q	см ³ /с			
6	Средняя скорость течения воды, V	см/с			
7	Температура воды, T	град. С			
8	Кинематическая вязкость, ν	см ² /с			
9	Число Рейнольдса, Re	-			
10	Режим движения	-			

2.7.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУЛЬСАЦИИ СКОРОСТЕЙ И ДАВЛЕНИЙ ТЕНЗОДАТЧИКОМ

Общие сведения

Принцип действия электрических датчиков основан на преобразовании механической энергии в электрическую. Такие датчики могут измерить давление величиной до 100 МПа. Большой популярностью из этого ряда датчиков пользуются тензорезисторные датчики, причём принцип работы последних для измерения давления и скорости являются одинаковыми.

Тензодатчик для измерения пульсации скорости показан на рис. 2.10.

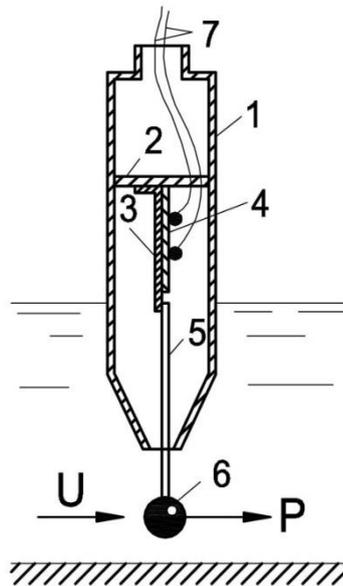


Рис.2.10. Схема тензодатчика для измерения скорости

В корпусе тензодатчика скорости 1 жестко укреплен неупругая балка 2, к которой приварена упругая пластина 3. На пластине 3 наклеен тензорезистор 4, который изменяет собственное сопротивление R в зависимости от деформации. К пластине 3 приварен штук 5, на конце которого закреплен приемный элемент 6 (шарик или кружок из металла). При помещении тензодатчика в турбулентный поток на приемный элемент оказывает воздействие скоростное давление. Это давление передается через штук 5 на упругую пластину 3, которая, изгибаясь под действием этого давления, заставляет изгибаться тензорезистор. Так как давление переменное во времени, сопротивление тензорезистора также изменяется, повторяя изменение давления.

Часто применяют мостовую схему (мост Уитсона) в качестве измерительного комплекса, к которой подсоединяются контакты 7 тензорезистора (рис. 2.11).

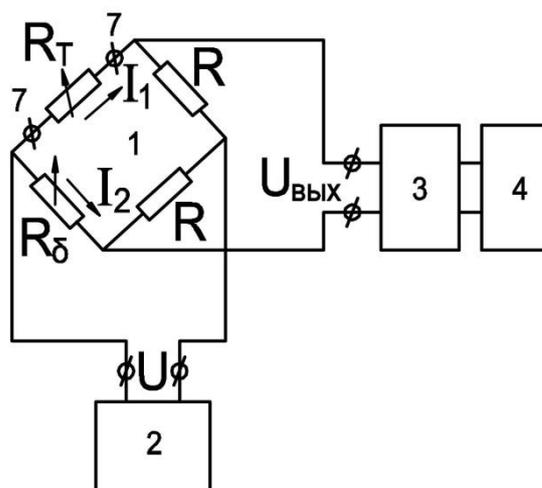


Рис. 2.11 Схема моста Уитсона

После включения тензодатчика в мост Уитсона 1, на него подается напряжение u , снимаемое с блока питания 2. Сопротивление R_T и есть сопротивление тензорезистора.

Сопротивление R_{δ} - балансное сопротивление, которое балансирует мост таким образом, чтобы в отсутствии давления на тензодатчик ток I_1 равнялся току I_2 и, таким образом, напряжение на выходе моста $u_{\text{вых}}=0$. Если на сбалансированный датчик воздействовать силой (давления), сопротивление R будет изменяться, возникнет разбаланс моста, изменится соотношение токов I_1 и I_2 и на выходе возникнет напряжение, пропорциональное давлению.

Это напряжение усиливается усилителем 3 и поступает на осциллограф 4, который служит для индикации. Зная коэффициент пропорциональности k , можно определить силу давления p

$$p = \frac{u_{\text{вых}}}{k}. \quad (2.15)$$

При некоторых режимах движения сила давления скоростного напора прямо пропорциональна скорости. В этом случае можно определить местную мгновенную скорость потока. В большинстве случаев скорость потока и давление на приёмный элемент имеют нелинейную связь и для определения скорости необходимо производить статическую и динамическую тарировку датчика. Собственная частота свободных колебаний описанного датчика скорости в воде составляет 120 Гц.

Конструкция тензодатчика давления приведена на рис.2.12.

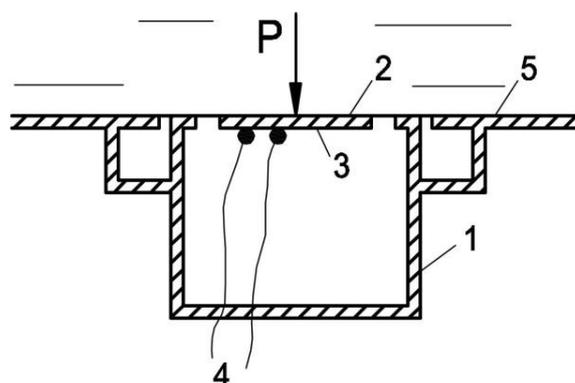


Рис. 2.12 Схема закрепления датчика для измерения давления

Датчик давления обычно закрепляется в дне лотка. Датчик состоит из корпуса 1, представляющего собой цилиндр. С одной стороны к корпусу припаяна тонкая упругая пластина 2, к которой приклеен тензорезистор 3. Контакты тензорезистора 4 подсоединяются к мостовой схеме, показанной на рис. 2. Действие схемы аналогично вышеописанному (для датчика скорости). Корпус тензодатчика жестко прикрепляется ко дну лотка 5 таким образом, чтобы упругая пластина 2 была заподлицо со дном. При действии гидродинамической нагрузки p на пластину, она прогибается, изгибая тензорезистор 3, который изменяет своё сопротивление пропорционально силе давления.

Датчики скорости и давления, перед началом их использования, подлежат соответственно тарировке и градуировке на специальных установках.

Цель лабораторной работы

Ознакомиться визуально с пульсациями давления и скоростей, которые выведены на осциллограф.

Описание лабораторной установки

Работу проводят в лабораторном лотке, в котором предусмотрено специальное крепление для установки тензодатчиков скорости и давления. Все геометрические размеры лотка приводятся на испытательном стенде.

Состав лабораторной работы: Ознакомиться визуально с пульсациями давления и скорости, которые выведены на осциллограф. Проведение 2, 3 опытов с разными скоростями и глубинами в гидравлическом лотке.

Порядок выполнения работы

Насосом воду подают в питающий бак, расход которой регулируется задвижкой. В лотке устанавливают режим с глубиной (и скоростью), соответствующий поданному расходу. На специальной штанге в поток вводят тензодатчик скорости, также в специальное “гнездо” устанавливают тензодатчик давления. К датчикам присоединяют измерительный комплекс, описанный выше. По показаниям осциллографа проводят анализ значений скорости в потоке, давления на дно и частоты их пульсаций. Затем подают другой расход, и в лотке устанавливается другая глубина, повторяют визуальное изучение показаний осциллографа.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия тензодатчика скорости.
2. Поясните принцип работы датчика давления.
3. Какой из двух датчиков, помещённых в лоток с покоящейся водой, даст показания и почему?
4. Влияет ли скоростной напор на показания датчика давления?
5. Что такое тензорезистор и зачем его используют в тензодатчиках?

2.8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ ПО ДЛИНЕ ТРУБОПРОВОДА

(коэффициент Дарси)

Общие сведения

Потери напора по длине при установившемся движении определяются по формуле Дарси- Вейсбаха

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{l}{4R} \frac{v^2}{2g}, \quad (2.16)$$

где λ - коэффициент гидравлического сопротивления по длине или коэффициент Дарси; R – гидравлический радиус; v – средняя скорость; l - длина рассматриваемого участка. Для цилиндрических трубопроводов диаметром d при

напорном движении гидравлический радиус $R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{\pi d^2}{4\pi d} = \frac{d}{4}$. В этом случае

потери напора по длине определяют по формуле

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (2.17)$$

Безразмерный коэффициент λ зависит от ряда характеристик: от диаметра и шероховатости трубы, вязкости и скорости движения. При разных режимах движения влияние этих факторов проявляются по – разному.

При ламинарном режиме λ зависит только от числа Рейнольдса. Для круглых труб

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (2.18)$$

При этом потери напора по длине трубы будут пропорциональны скорости в первой степени $h_{дл} = k v$.

При турбулентном режиме существуют три области сопротивления, для которых значения λ будут различными.

В области гидравлических гладких стенок, где толщина вязкого, пристенного слоя δ_v , больше высоты выступов шероховатости стенки Δ ($\Delta \ll \delta_v$), коэффициент Дарси зависит только от числа Рейнольдса Re и определяется по формуле Блазиуса

$$\lambda_{гг} = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (2.19)$$

Область гидравлически гладких стенок существует при изменении числа Рейнольдса в следующем диапазоне:

$$Re_{кр} < Re \leq Re_{гг} \approx 20 \left(\frac{d}{\Delta_s} \right), \quad (2.20)$$

Потери напора по длине трубы в области гладких труб будут

$$h_{дл} = k v^{1,75}.$$

В переходной области гидравлического сопротивления

$$\Delta \approx \delta, \text{ поэтому } \lambda = f(Re, \Delta/d).$$

Потери напора по длине трубы в переходной области будут

$$h_{дл} = k v^{1,75-2}.$$

Переходная область гидравлического сопротивления существует при числах Re , изменяющихся в диапазоне:

$$Re_{гг} = 20 \left(\frac{d}{\Delta_s} \right) < Re < Re_{кв} \approx 500 \left(\frac{d}{\Delta_s} \right) \quad (2.21)$$

Коэффициент Дарси в этой области сопротивления рекомендуется определять по формуле А.Д. Альтшуля

$$\lambda_{пер} = 0,11 \left(\frac{\Delta_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (2.22)$$

Формула (2.22) – универсальная и ее можно применять для любой области сопротивления турбулентного потока.

Область шероховатых стенок (квадратичная область сопротивления при $\Delta \gg \delta_v$). Эта область существует при

$$Re > Re_{кв} \approx 500 \left(\frac{d}{\Delta_s} \right). \quad (2.23)$$

Значения коэффициента Дарси в этой области зависят только от относительной шероховатости $\lambda = f(\Delta/d)$ и могут определяться по формуле Шифрисона

$$\lambda_{кв} = 0,11 \left(\frac{\Delta_s}{d} \right)^{0,25} \quad (2.24)$$

В этой области потери напора по длине трубы пропорциональны квадрату скорости, поэтому зону гидравлически шероховатых стенок называют квадратичной

$$h_{дл} = k v^2.$$

В технических трубопроводах в качестве Δ принимают так называемую эквивалентную шероховатость $\Delta_э$ (табл. 2.7).

Цель лабораторной работы

Экспериментально изучить потери напора по длине трубопровода и определить коэффициенты Дарси λ при различных скоростях движения воды. Сравнить значения λ , полученные из опыта, с вычисленными по соответствующим формулам.

Описание лабораторной установки

Прямолинейный участок трубопровода постоянного диаметра ограничивают два сечения, в которых установлены пьезометры. Плоскость сравнения проводим через ось трубы, если она горизонтальная, или через центр второго сечения, если труба наклонная (рис.2.13). За пределами рассматриваемого участка трубопровод оборудован вентилем 4, регулирующим расход, и устройством 5 для измерения расхода.

Длину участка трубы l между выбранными сечениями, внутренний диаметр трубы d и расстояние между центрами сечений z определяют предварительно и указывают на схеме установки. Температуру воды измеряют термометром.

Эквивалентная шероховатость $\Delta_э$ для труб из различных материалов

Таблица 2.7

Вид трубы	Состояние трубы	Δ , мм
Тянутые из стекла и цветных металлов	Новые, технически гладкие	0-0.002
Бесшовные стальные	Новые чистые, тщательно уложенные	0.01-0.02
Стальные сварные	Новые чистые Умеренно заржавевшие Сильно заржавевшие или с большими отложениями	0.03-0.1 0.3-0.7 2-4
Оцинкованные железные	Новые чистые	0.1-0.2
Чугунные	Новые без покрытия Бывшие в употреблении	0.2-0.5 0.5-1.5
Асбестоцементные	Новые	0.05-0.1
Бетонные	Новые Бывшие в употреблении Из необработанного бетона	0.15-0.3 0.3-0.8 1-3
Полиэтиленовые 2-20мм	Новые чистые	0.003

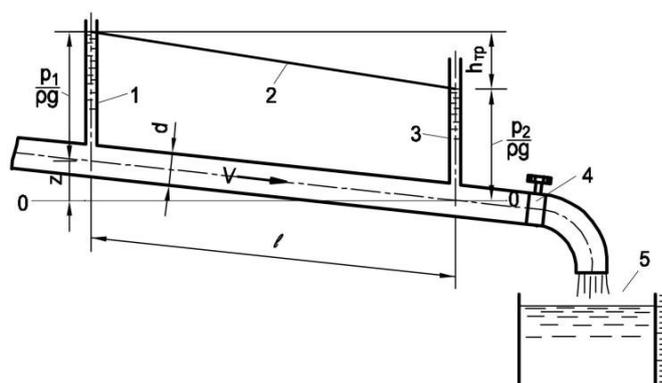


Рис.2.13 Схема лабораторной установки для определения потерь напора по длине:

1,3-пьезометры; 2-пьезометрическая линия; 4- вентиль; 5-мерный бак

Порядок выполнения работы

Потери напора по длине можно найти из уравнения Бернулли, составленного для двух сечений прямолинейного участка трубы постоянного сечения без местных сопротивлений:

$$h_{\text{тр}} = h_{\text{дл}} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right).$$

Поскольку средняя скорость на участке постоянна ($v_1 = v_2$) и $\alpha_1 = \alpha_2$, то

$$h_{\text{дл}} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right),$$

а для горизонтального участка при $z_1 = z_2$

$$h_{\text{дл}} = \left(\frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} \right).$$

После установления постоянного расхода Q в трубе снимают показания пьезометров $\left(\frac{p_1}{\rho g} \right)$ и $\left(\frac{p_2}{\rho g} \right)$, присоединённых к трубопроводу на расстоянии l один от другого. Разность показаний пьезометров определит потери по длине $h_{\text{дл}}$. Так как потери по длине в трубе равны

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{l v^2}{d 2g},$$

то отсюда опытное значение λ будет

$$\lambda = h_{\text{дл}} \frac{d 2g}{l v^2}.$$

Расход определяют объёмным способом, измеряя время t наполнения мерного бака объёмом W . Следует определять λ из опыта несколько раз в различных областях сопротивления, меняя величину расхода в трубопроводе. Измеряют температуру воды.

Порядок обработки результатов

Для определения коэффициента Дарси надо предварительно вычислить площадь живого сечения $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$ трубопровода, определить среднюю скорость

течения воды $v = \frac{Q}{\omega}$. Потери напора по длине $h_{\text{дл}} = \left(z + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} \right)$. При горизонтальной трубе $z = 0$. Коэффициент Дарси по опытным данным

$$\lambda = h_{\text{дл}} \frac{d 2g}{l v^2}.$$

Кинематическая вязкость ν определяется в зависимости от измеренной температуры T по графику связи $\nu = f(T)$ или по таблице 1.1. Находят число Рейнольдса $Re = vd/\nu$.

Если $Re < Re_{\text{кр}}$, то режим движения воды ламинарный и коэффициент Дарси находят по формуле (2.18) $\lambda = \frac{64}{Re}$.

Если $Re > Re_{кр}$, то режим движения воды турбулентный, надо выяснить область сопротивления по формулам (2.20, 2.21, 2.23) и вычислить λ по соответствующей этой области формуле и сравнить с опытными значениями.

Предварительно надо определить (табл.2.7) значение эквивалентной шероховатости Δ , в зависимости от вида труб.

Контрольные вопросы

1. Приведите формулу потерь по длине и поясните входящие в неё величины.
2. Как опытным путём найти значение λ ?
3. От каких характеристик зависит коэффициент Дарси?
4. При каких условиях коэффициент λ не зависит от шероховатости?
5. В какой зоне сопротивления коэффициент λ не зависит от числа Re ?
6. Почему одну из зон сопротивления называют квадратичной?

Таблица 2.8

№	Показатели	Единицы измерения	опыт			
			1	2	3	4
1	Объем воды в мерном баке, W	см ³				
2	Время, t	с				
3	Расход, $Q = W/t$	см ³ /с				
4	Материал трубы					
5	Внутренний диаметр трубы, d	см				
6	Площадь живого сечения, ω	см ²				
7	Средняя скорость течения воды в сечениях, $v = Q/\omega$	см/с				
8	Показание 1-его пьезометра, $p_1/\rho g$	см				
9	Показание 2-его пьезометра, $p_2/\rho g$	см				
10	Расстояние по вертикали между центрами сечений, z	см				
11	Потери напора по длине, $h_{тр}$	см				
12	Коэффициент λ из опыта					
13	Температура воды, T	°C				
14	Кинематическая вязкость, ν	см ² /с				
15	Число Рейнольдса, $Re = vd/\nu$					
16	Режим движения					
17	Коэффициент λ по формуле					
18	Относительное расхождение	%				

2.9. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ.

Общие сведения

При истечении жидкости через малые отверстия и насадки расход воды определяется по формуле

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_0}, \quad (2.25)$$

где H_0 - действующий напор; ω - площадь выходного отверстия; μ - коэффициент расхода.

Отверстие считают малым, если его вертикальный размер не превышает 0.1 Н.

При свободном истечении в атмосферу действующий напор

$$H_0 = H + \frac{\alpha V_0^2}{2g} + \frac{P_0 - P_{AT}}{\rho g}, \quad (2.26)$$

где H - напор над отверстием, представляющий собой разность между уровнем воды и центром отверстия; V_0 - скорость подхода к отверстию; P_0 - давление на свободной поверхности в резервуаре.

При малых скоростях течения жидкости в резервуаре часто скоростным напором пренебрегают. Если резервуар открыт, то $P_0 = P_{AT}$ и $H_0 = H$.

Коэффициент расхода μ объединяет коэффициенты скорости φ и сжатия ε , т.е. $\mu = \varphi \varepsilon$. При истечении через отверстие происходит сжатие струи, величина которого характеризуется коэффициентом сжатия

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}, \quad (2.27)$$

где ω_c - площадь живого сечения струи в сжатом сечении.

Сжатое сечение находится на расстоянии около половины диаметра от внутренней поверхности стенки резервуара.

Если к отверстию присоединён короткий отрезок трубы (насадок), то сжатое сечение оказывается внутри насадка, а на выходе из насадка сжатия потока нет и коэффициент сжатия $\varepsilon = 1$, а коэффициент расхода насадка $\mu_{НАС} = \varphi_{НАС}$.

Коэффициент скорости зависит от распределения скоростей в сжатом сечении и от сопротивлений при истечении через отверстия или насадки

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}}, \quad (2.28)$$

где α - коэффициент кинетической энергии, здесь практически равный единице; ξ - коэффициент сопротивления.

При истечении через отверстие существует только сопротивление тонкой стенки, т.е. $\xi = \xi_{ТС}$. При истечении через насадок потерями по длине пренебрегают ввиду их малости и учитывают только потери на вход в насадок, т.е. $\xi = \xi_{ВХ}$.

Внешний цилиндрический насадок представляет собой отрезок прямой цилиндрической трубы диаметром d и длиной $l_{НАС} = (3..4)d$, присоединённый под прямым углом к отверстию с внешней стороны резервуара (рис.2.14 а). Внутри насадка из-за сжатия струи образуется зона пониженного давления - вакуум. При этом скорость течения жидкости в сжатом сечении становится

больше, чем при истечении через малое отверстие в тонкой стенке. Несмотря на увеличение сопротивлений, пропускная способность насадка больше чем отверстия.

Теоретическая величина вакуума для цилиндрического насадка может достигать значения $h_{\text{ВАК}} = 0.74H_0$. А так как предельное значение $h_{\text{ВАК}} = 10\text{м}$ вод. столба, то максимальное значение напора перед насадком будет равно $H = \frac{h_{\text{ВАК}}}{0.74} = 13.5\text{м}$. Практически при $H > 13\text{м}$ произойдёт срыв вакуума и насадок будет работать как отверстие.

Нецилиндрические насадки могут быть сходящимися и расходящимися. У конически сходящихся насадков наибольшая пропускная способность обеспечивается, если угол конусности $\theta = 13,4^\circ$ (рис.2.14 б).

При истечении жидкости через некруглые отверстия форма сечения струи отличается от формы отверстия. Это явление называется инверсией струи.

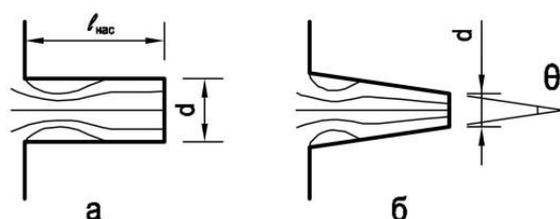


Рис.2.14 Схемы насадков:

а - цилиндрический насадок; б - конический насадок

Коэффициенты μ , ϵ , ϕ , ξ для малого отверстия и насадков

Таблица 2.9

Отверстие и насадки	μ	ϵ	ϕ	ξ
Малое отверстие в тонкой стенке	0.62	0.64	0.97	0.06
Внешний цилиндрический насадок	0.82	1.00	0.82	0.50
Конически сходящийся насадок ($\theta = 13^\circ$)	0.95	0.98	0.97	0.06
Конически расходящийся насадок ($\theta = 6^\circ$)	0.45	1.00	0.45	3.94

Цель лабораторной работы

Определить опытным путём числовые значения коэффициентов расхода, сжатия, скорости и сопротивлений при истечении жидкости через отверстия и насадки при постоянном напоре.

Описание лабораторной установки

Резервуар имеет на стенке отверстие со специальным устройством, к которому можно присоединять различные насадки (рис.2.15). Резервуар снабжён пьезометром для измерения напора. Ноль шкалы пьезометра должен находиться на уровне оси отверстия. Под вытекающую в атмосферу струю жидкости подставляют мерный бак для измерения расхода воды объёмным способом.

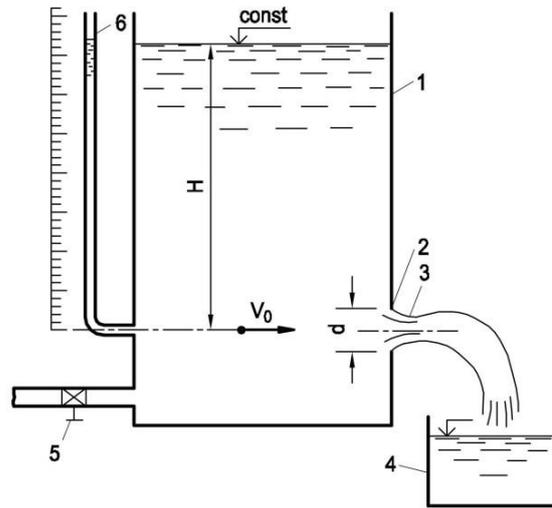


Рис.2.15 Схема лабораторной установки для изучения истечения жидкости через малые отверстия и насадки:
 1- резервуар; 2 - отверстие; 3 - сжатое сечение; 4 - мерный бак; 5 - вентиль; 6 - пьезометр

Порядок выполнения работы

1. В лабораторный журнал записывают указанные на схеме установки диаметры d отверстия и насадков, объем W мерного бака. При круглом отверстии в стенке резервуара устанавливают постоянный уровень воды; это произойдет, когда поступающий в резервуар расход воды будет равен расходу, вытекающему из отверстия. Снимают отсчет по шкале пьезометра, т.е. измеряют напор H . Так как при истечении через круглое отверстие струя в сжатом сечении принимает форму эллипса, то штангенциркулем измеряют вертикальный d_1 и горизонтальный d_2 диаметры струи. Направляют струю в мерный бак и наполняют его до краёв, одновременно определяя время наполнения секундомером.

2. К отверстию присоединяют один из исследуемых насадков. Опыт повторяют (размеры сжатого сечения не измеряют). Если насадок выполнен из оргстекла, можно наблюдать зону вакуума и измерить его величину. Для этого присоединённый к сжатому сечению пьезометр опускают в сосуд с подкрашенной жидкостью и измеряют высоту $h_{\text{ВАК}}$ столба жидкости, поднявшейся из-за разности атмосферного давления в сосуде и пониженного давления в насадке.

3. Вставляют фасонную часть с некруглым отверстием, например, с квадратным. Наблюдают инверсию струи. При истечении жидкости через квадратное отверстие вблизи него сечение струи становится восьмиугольным, затем приобретает крестообразную форму.

Порядок обработки результатов

Вычисляют: площадь отверстия $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$; площадь сжатого сечения

$$\omega_c = \frac{\pi d_1 d_2}{4}; \text{ коэффициент сжатия струи } \varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega};$$

$$\text{расход воды } Q = \frac{W}{t}; \text{ коэффициент расхода } \mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}};$$

коэффициент скорости $\varphi = \frac{\mu}{\varepsilon}$; коэффициент сопротивления $\xi = \frac{1}{\varphi^2} - 1$.

Таким же образом определяются Q , ω и значения коэффициентов μ , φ , ζ при истечении через насадки различных видов. Полученные опытные значения коэффициентов сравниваются с коэффициентами, взятыми из справочной литературы.

Контрольные вопросы

1. Почему при одном и том же напоре и диаметре отверстия через внешний цилиндрический насадок пройдет расход больший, чем через малое отверстие?
2. От чего зависит коэффициент скорости и в каком случае он больше: при истечении через насадок или отверстие?
3. Что называется насадком? Какие потери на трение учитываются при его расчёте?
4. Почему при истечении через насадок образуется вакуум и чему равна его предельная величина в цилиндрическом насадке?
5. Может ли коэффициент скорости быть меньше единицы, равен единицы, быть больше единицы?
6. Какие значения примут коэффициенты μ , φ , ε , ζ для идеальной невязкой жидкости?
7. Что такое инверсия струи?

Таблица 2.10

№ п/п	Наименование	Един. измер.	Круглое отверстие	Насадки	
				цилиндрический	конические сходящийся
1	Диаметр отверстия (насадка), d	см			
2	Площадь отверстия, ω	см ²			
3	Объем воды в мерном баке, W	см ³			
4	Время наполнения мерного бака, t	с			
5	Расход воды, Q	см ³ /с			
6	Напор над центром отверстия, H	см			
7	Коэффициент расхода, μ	-			
8	Диаметр струи в сжатом сечении, d_1	см			
9	Диаметр струи в сжатом сечении, d_2	см			
10	Коэффициент сжатия, ε	-			
11	Коэффициент скорости, φ	-			
12	Коэффициент потерь, ζ	-			

№ п/п	Наименование	Един. измер.	Круглое отверс- тие	Насадки	
				цилиндр ический	кони- че ски сходя щийся
13	$h_{\text{ВАК}}$ в цилиндрическом насадке	см			

2.10. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПОРЕ

Общие сведения

Истечение жидкости при переменном напоре является движением неустановившемся, так как расход воды, скорость и напор изменяются во времени.

При истечении жидкости из цилиндрического резервуара с площадью поперечного сечения Ω через отверстие в его оболочке напор за период времени t изменяется от H_1 до H_2 . Если при этом приток жидкости в резервуар отсутствует, то время t определяется по формуле

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}), \quad (2.29)$$

где ω – площадь отверстия; μ – коэффициент расхода.

Цель лабораторной работы

Измерить время, в течение которого напор над центром отверстия в резервуаре изменяется от H_1 до H_2 и сравнить измеренное время с вычисленным по теоретической формуле.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой цилиндрический резервуар с отверстием на стенке и пьезометром для определения напора (рис.2.16).

Порядок выполнения работы

В лабораторный журнал записывают диаметр отверстия d , диаметр поперечного сечения резервуара D и величины напоров H_1 и H_2 , значениями которых задаются.

После наполнения резервуара задвижка на трубопроводе, соединяющем напорный бак лаборатории с резервуаром, закрывается и поступления воды в резервуар во время опыта не происходит.

Открывается отверстие в резервуаре и напор H над центром отверстия начинает уменьшаться. Уровень воды в пьезометре, присоединённом к резервуару, опускается. При некотором значении напора H_1 следует включить секундомер и затем остановить его при значении напора H_2 .

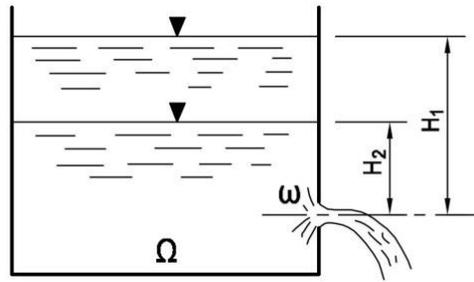


Рис.2.16 Схема лабораторной установки для изучения истечения жидкости через отверстия при переменном напоре

Порядок обработки результатов

Вычисляют: площадь отверстия $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$; площадь поперечного сечения

резервуара $\Omega = \frac{\pi D^2}{4}$; время изменения напоров от H_1 до H_2

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})$$

(значения коэффициентов расхода μ принимаются для истечения через малое отверстие по таблице 2.9).

Вычисленное время t сравнивают с измеренным в опытах временем.

Контрольные вопросы

1. Учитываются или нет потери на трение при вычислении времени t изменения напоров от H_1 до H_2 ?
2. Как изменится величина времени t , если к отверстию присоединить внешний цилиндрический насадок?
3. Почему истечение жидкости из резервуара при переменном напоре является неустановившемся движением?

Таблица 2.11

№ п/п	Наименование	Един. измер.	Опыты		
			1	2	3
1	Диаметр резервуара, D	см			
2	Площадь сечения резервуара, Ω	см ²			
3	Диаметр отверстия, d	см			
4	Площадь отверстия, ω	см ²			
5	Начальный напор, H_1	см			
6	Конечный напор, H_2	см			
7	Фактическое время истечения, t	с			
8	Вычисленное время истечения, t	с			
9	Разница в %	%			

2.11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА И СКОРОСТИ ПОТОКА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ ПРИ ЗАДАННОМ НАПОРЕ

Общие сведения

Трубопровод, не имеющий ответвлений, состоящий из труб одинакового диаметра, выполненных из одного материала - называется простым трубопроводом (рис. 2.17).

Если потери напора по длине трубопровода во много раз больше местных потерь напора, которыми при расчёте можно пренебречь, то такой трубопровод называется гидравлически длинным.

В таком трубопроводе при постоянном напоре движение жидкости равномерное.

Расход Q , проходящий неизменным до конца рассматриваемого участка трубопровода длиной l и диаметром d , называют транзитным расходом. Так как весь напор H затрачивается на преодоление потерь напора по длине, т.е. $H = h_{дл}$,

то при $\frac{v^2}{2g} \ll H$ гидравлический уклон I будет равен

$$I = \frac{h_{дл}}{l} = \frac{H}{l} \quad (2.30)$$

Расчётной формулой гидравлически длинного простого трубопровода является формула Шези

$$v = C\sqrt{RI}, \quad (2.31)$$

где C - коэффициент Шези; $R = \frac{\omega}{\chi}$ - гидравлический радиус; χ - смоченный периметр.

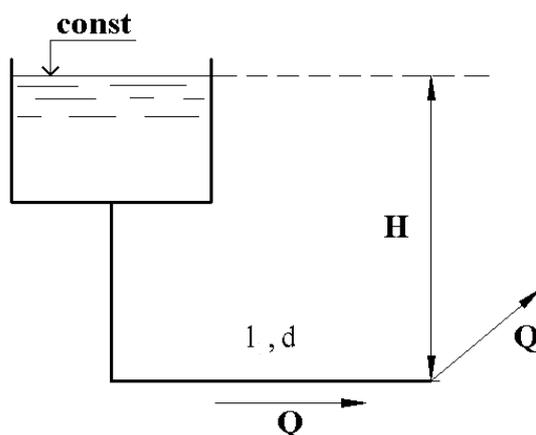


Рис.2.17 Схема простого трубопровода

Для трубы при напорном движении

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

Расход Q определяется по формуле

$$Q = \omega C \sqrt{RI} \quad (2.32)$$

Обозначив $\omega C \sqrt{R} = K$, получим вместо (2.32)

$$Q = K \sqrt{I} \quad (2.33)$$

и

$$H = \frac{Q^2}{K^2} \cdot 1, \quad (2.34)$$

где величина K представляет собой расход жидкости в русле заданного живого сечения при гидравлическом уклоне I , равном единице, и называется расходной характеристикой.

Обозначив $\frac{1}{K^2} = A$, получим

$$H = A \cdot Q^2, \quad (2.35)$$

где величина $A = \frac{1}{K^2}$, равная потере напора на единице длины трубопровода,

при расходе Q , равном единице, носит название удельного сопротивления трубопровода.

Коэффициент Шези C связан с коэффициентом Дарси и зависит от области гидравлического сопротивления

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}, \quad (2.36)$$

где $\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{\Delta}{d}\right)$.

Обозначим отношение коэффициента Шези C для любой области сопротивления к коэффициенту Шези $C_{\text{кв}}$ для квадратичной области сопротивления через θ_1 , так что

$$C = \theta_1 C_{\text{кв}} \text{ и } K = \theta_1 K_{\text{кв}}.$$

С учётом θ основные расчётные формулы (2.33) и (2.34) примут вид

$$Q = \theta_1 K_{\text{кв}} \sqrt{\frac{H}{1}}; \quad (2.37)$$

$$H = \theta_2 Q^2 \frac{1}{K_{\text{кв}}^2}, \quad (2.38)$$

где $\theta_2 = \frac{1}{\theta_1^2}$.

Следует отметить, что величина K и расход Q выражаются в одинаковых единицах, обычно в литрах в секунду – л/с.

Для определения расходных характеристик $K_{\text{кв}}$, а также значений коэффициентов θ_1 и θ_2 можно использовать таблицы 1 и 2 приложения 5 ([2]).

Значение скорости $v_{\text{кв}}$, при превышении которой наступает квадратичная область сопротивления, приводятся в таблице 13.1 [2].

Для установления области сопротивления следует вычислить фактическую скорость движения воды $v = \frac{Q}{\omega}$ и сравнить ее с $v_{\text{кв}}$. При $v \geq v_{\text{кв}}$ область

сопротивления квадратичная и $\theta_1 = \theta_2 = 1$. При $v < v_{\text{кв}}$ область сопротивления не квадратичная (либо переходная, либо гладкостенная). Тогда $\theta_1 < 1$ и $\theta_2 > 1$.

Цель работы

Экспериментально проверить расчёт расхода и средней скорости в трубе по заданному напору.

Описание лабораторной установки

Работу проводят на установке, которая использовалась в лабораторной работе «Определение гидравлического коэффициента трения по длине трубопровода». На схеме установки (рис.2.14) указывают вид труб, длину l участка трубы и ее внутренний диаметр d . В начале и конце участка устанавливают пьезометры. Если труба не горизонтальная, то измеряют расстояние z по вертикали между центрами сечений. Установку снабжают устройством для измерения расхода.

Порядок выполнения работы

После установления постоянного расхода Q в трубе снимают показания пьезометров, присоединённых к трубопроводу на расстоянии l один от другого. Разность показаний пьезометров определит потери по длине $h_{\text{дл}}$. Так как при расчёте гидравлически длинного трубопровода потери по длине $h_{\text{дл}}$ равны напору H , то

$$H = h_{\text{дл}} = \left(z + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} \right),$$

(если труба горизонтальная, то $z = 0$).

Расход, протекающий через трубу, определяют объёмным способом, измеряя время t наполнения мерного бака объёмом W . Проводят несколько опытов при разных значениях расхода Q и напора H в трубопроводе.

Порядок обработки результатов

Предварительно вычисляют площадь живого сечения $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$ трубопровода, расход, протекающий через трубу $Q = W/t$, среднюю скорость течения воды $v = \frac{Q}{\omega}$, разность показаний пьезометров $H = h_{\text{дл}} =$

$$\left(z + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} \right).$$

По таблице 13.1 [2] определяют граничное значение скорости $v_{\text{кв}}$. Для вычисления расчётного расхода предварительно сравнивают среднюю скорость v в каждом опыте с граничным значением $v_{\text{кв}}$. Если $v \geq v_{\text{кв}}$, то область

сопротивления квадратичная и $\theta_1=1$. При $v < v_{\text{кв}}$ - область сопротивления не квадратичная, надо искать поправку θ_1 по таблице 1 и 2 приложения 5 ([2]).

Для каждого опытного значения H определяют расчётное значение расхода

$$Q_{\text{расч}} = \theta_1 K_{\text{кв}} \sqrt{\frac{H}{l}}$$
 и

расчётное значение скорости

$$v_{\text{расч}} = \frac{Q_{\text{расч}}}{\omega}$$

Находят расхождение (в процентах) между опытными значениями Q и v и расчётными $Q_{\text{расч}}$ и $v_{\text{расч}}$

$$\delta_Q = (Q - Q_{\text{расч}}) 100 / Q_{\text{расч}}$$

$$\delta_v = (v - v_{\text{расч}}) 100 / v_{\text{расч}}$$

Контрольные вопросы

1. Какие трубопроводы называют простыми?
2. При каких условиях трубопровод считают гидравлически длинным? Что представляет собой напор при этих условиях?
3. Напишите расчётную формулу расхода при равномерном движении и поясните все входящие в неё величины.
4. Что такое расходная характеристика и как ее определяют?

Таблица 2.12

№	Показатели	Единицы измерения	опыт		
			1	2	3
1	Объем воды в мерном баке, W	см ³			
2	Время, t	с			
3	Расход, $Q = W/t$	см ³ /с			
4	Длина участка трубы, l	м			
5	Внутренний диаметр трубы, d	см			
6	Площадь живого сечения, ω	см ²			
7	Средняя скорость течения воды в сечениях, $v = Q/\omega$	см/с			
8	Расстояние по вертикали между центрами сечений, z	см			
9	Показание первого пьезометра, $p_1/\rho g$	см			
10	Показание второго пьезометра, $p_2/\rho g$	см			
11	Напор, $H = h_{\text{тр}}$	см			
12	Граничное значение, $v_{\text{кв}}$	м/с			

13	Расходная характеристика, $K_{кв}$	л/с			
14	Поправка, θ_1				
15	Расход воды по расчёту, $Q_{расч}$	л/с			
16	Средняя скорость движения воды по расчёту, $v_{расч}$	м/с			
17	Вид трубы				
18	Расхождение, δ_Q	%			
19	Расхождение δ_v	%			

2.12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ УДАРЕ

Общие сведения

При быстром изменении скорости движения жидкости в одном из сечений напорного трубопровода возникает гидравлический удар. В результате волна изменения давления распространяется с большой скоростью по трубопроводу и вызывает деформации его стенок.

Если допустить, что задвижку в конце трубы длиной L можно закрыть мгновенно, то величину изменения давления можно определить по формуле основоположника теории гидравлического удара Н.Е. Жуковского:

$$\Delta p = \rho c v_0, \quad (2.39)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м^3 ; c — скорость распространения волны гидравлического удара вдоль трубопровода, т.е. скорость ударной волны, м/с; v_0 — средняя скорость потока в трубе при установившемся движении до гидравлического удара, м/с.

Скорость распространения ударной волны можно определить по формуле Жуковского:

$$c = \sqrt{\frac{E_{ж}/\rho}{1 + \frac{D E_{ж}}{e E}}}, \quad (2.40)$$

где $E_{ж}$ — модуль упругости жидкости, Па; D — внутренний диаметр трубы, м; e — толщина стенок трубы, м; E — модуль упругости материала стенок трубы, Па.

Для воды ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $E_{ж} = 20,3 \cdot 10^8 \text{ Па}$) числитель уравнения (2.40) $\sqrt{E_{ж}/\rho} = 1425 \text{ м/с}$.

При гидравлическом ударе ярко проявляется сжимаемость жидкости.

В реальных условиях время закрытия задвижки T_3 всегда больше нуля, поэтому различают:

прямой удар, когда соблюдается условие $T_3 < 2L/c$ и величину наибольшего повышения давления определяют во формуле $\Delta p = \rho c v_0$, как при мгновенном закрытии;

непрямой удар, когда $T_3 > 2L/c$ и наибольшее повышение давления меньше, чем при мгновенном закрытии $\Delta p < \rho c v_0$. Если средняя скорость в сечении у задвижки меняется в зависимости от времени по линейному закону, то при непрямом ударе

$$\Delta p = 2\rho l v_0 / T_3 \quad (2.41)$$

Время пробега ударной волны по трубе от задвижки до резервуара и обратно называют фазой удара и обозначают $\tau_0 = 2L/c$.

Цель лабораторной работы

Экспериментальное изучение гидравлического удара в напорном трубопроводе при резком закрытии задвижки и сопоставление опытных данных с расчётными.

Описание лабораторной установки

Установка состоит из напорного резервуара 1 и трубопровода 3 достаточно большой длины (рис.2.18). Вентиль 2 служит для регулирования поступающего в трубу расхода, а значит, и средней скорости в сечении. Индикатор 4 фиксирует изменение давления на индикаторной диаграмме 7 в определённом масштабе. Масштаб δ_p диаграммы определяют до опытов и указывают на схеме установки. Определяют время полного закрытия задвижки 5 и указывают на схеме. Для измерения расхода используют мерный бак 6 или другой расходомер.

До начала опыта известными также являются материал и внутренний диаметр трубы, толщина стенок, расстояние от задвижки 5 до резервуара, которые определяют при изготовлении установки и указывают на ее схеме.

Состав лабораторной работы: 1. Определение опытным путём наибольшего повышения давления у задвижки при гидравлическом ударе. Проведение 2, 3 опытов с разными значениями средней скорости в живом сечении до удара. 2. Определение повышения давления у задвижки по расчётным формулам и сравнение результатов.

Порядок выполнения работы

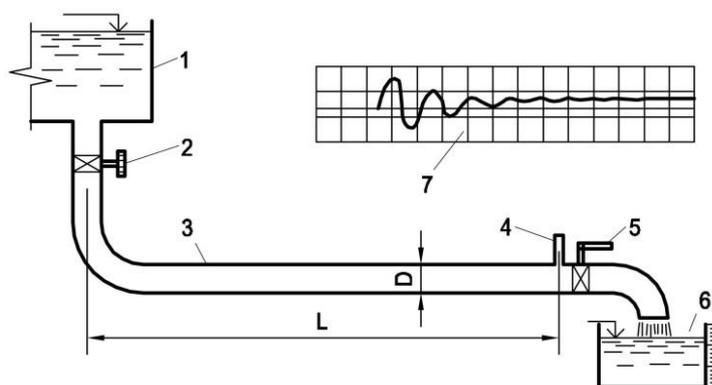


Рис. 2.18 Схема лабораторной установки для изучения гидравлического удара:
 1 – напорный резервуар; 2 – вентиль; 3 – трубопровод;
 4 – индикатор давления; 5 – задвижка; 6 – мерный бак;
 7 – индикаторная диаграмма

В лабораторный журнал (табл.2.13) записывают внутренний диаметр, толщину стенки, длину и материал трубы, масштаб δ_p , время полного закрытия задвижки. Насосом воду подают в напорный бак. Открывают вентиль 2 и при

полностью открытой задвижке 5 добиваются установившегося движения, т.е. постоянства расхода.

Измеряют объем воды в мерном баке и время его наполнения (или снимают показание другого расходомерного устройства). Результаты измерений записывают в лабораторный журнал.

Подключают индикатор и лентопотяжный механизм самописца, записывают сигнал, соответствующий установившемуся равномерному движению. Резко закрывают задвижку 5 и записывают изменение давления по времени. На движущейся масштабной бумажной ленте фиксируются отклонение давления от первоначального значения и затухание колебаний. Индикатор отключают.

Для проведения следующего опыта полностью открывают задвижку 5 и вентилем 2 устанавливают другой расход. Необходимо выдержать время и убедиться, что движение воды стало установившимся. Измерения повторяют. Результаты измерений записывают в лабораторный журнал.

До опытов измеряют: D - внутренний диаметр трубы; e - толщину стенок трубы; L - длину трубы от задвижки 5 до резервуара (напорного бака).

Во время опытов измеряют: W - объем воды в мерном баке; t - время наполнения мерного бака; Δh - максимальный отсчет по индикаторной диаграмме.

Порядок обработки результатов

Используют следующие исходные данные: жидкость - вода; модуль упругости жидкости $E_{ж} = 20,3 \cdot 10^8$ Па; плотность жидкости $\rho = 1000$ кг/м³.

Значение модуля упругости E материала трубы или отношение $E_{ж}/E$ находят по таблице 14.1 [2].

1. Вычисляют: площадь живого сечения $\omega = \pi d^2/4$; скорость распространения ударной волны (в метрах в секунду) $c = 1425 / \sqrt{1 + \frac{D}{e} \frac{E_{ж}}{E}}$; фазу удара $\tau_0 = 2L/c$.

Если известно время T_3 полного закрытия задвижки, то, сравнивая значения T_3 и τ_0 , делают вывод о том, какой случай имел место. При $T_3 < \tau_0$ удар прямой. При $T_3 > \tau_0$ удар не прямой.

В каждом опыте по максимальному отсчёту на индикаторной диаграмме вычисляют наибольшее повышение давления у задвижки $\Delta p = \delta_p \cdot \Delta h$;

2. Для определения расчётного значения $\Delta p_{расч}$ находят: расход при установившемся движении $Q = W/t$; среднюю скорость течения воды в живом сечении до удара $v_0 = Q/\omega$.

При прямом ударе наибольшее повышение давления у задвижки вычисляют по формуле (2.39). При не прямом ударе $\Delta p_{расч}$ вычисляют по формуле (2.41) или по экспериментальной зависимости для конкретной задвижки.

Расхождение (в процентах) между опытными и расчётными значениями наибольшего повышения давления у задвижки составляет

$$\epsilon_p = (\Delta p - \Delta p_{расч}) 100 / \Delta p_{расч} .$$

При неизвестном значении T_3 можно сделать заключение о виде гидравлического удара, оценивая значение τ_0 и расхождение между Δp и $\Delta p_{расч}$. В лабораторных условиях длина трубы не превышает 40 м, поэтому фаза удара составляет сотые доли секунды. Практически трудно более быстро закрыть задвижку. Обычно получается, что $T_3 > \tau_0$, удар не прямой и $\Delta p < \rho v_0^2$.

Контрольные вопросы

1. Какие свойства жидкости являются определяющими при возникновении гидравлического удара?
2. От чего зависит скорость распространения ударной волны?
3. При каких условиях возникает прямой (непрямой) гидравлический удар? Чем отличаются эти случаи?
4. Каким должно быть время полного закрытия задвижки, чтобы повышение давления не достигло $\Delta p = \rho c v_0$?
5. В какой трубе (стальной или бетонной) быстрее распространяется повышение давления при гидравлическом ударе?

Таблица 2.13

№№ п/п	Показатели	Един. измер.	Опыт		
			1	2	3
1	Материал трубы				
2	Модуль упругости материала трубы, E	Па			
3	Внутренний диаметр трубы, D	мм			
4	Площадь живого сечения, ω	м ²			
5	Толщина стенок трубы, e	мм			
6	Скорость распространения ударной волны, c	м/с			
7	Длина трубы, L	м			
8	Фаза удара, t_0	с			
9	Время полного закрытия задвижки, T_z	с			
10	Масштаб индикаторной диаграммы, δ_p	Па/мм			
11	Вид удара				
12	Отсчёт по индикаторной диаграмме, Δh	мм			
13	Наибольшее повышение давления в опытах, Δp	Па			
14	Объём воды в мерном баке W	м ³			
15	Время наполнения мерного бака, t	с			
16	Расход воды, Q	м ³ /с			
17	Средняя скорость течения воды в живом сечении до удара, v_0	м/с			
18	Наибольшее повышение давления по формуле, $\Delta p_{расч}$	Па			
19	Расхождение, Δp	%			

2.13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТАРАНА

Общие сведения

Гидравлический таран, схема которого приведена на рис. 2.19, представляет собой водоподъёмный механизм, работающий автоматически и

действующий на основе явлений, сопровождающих гидравлический удар в напорном трубопроводе.

Перед включением тарана ударный клапан К закрыт и находится под давлением $p_0 = \rho gh$; нагнетательный клапан М находится в равновесии при равенстве давлений с обеих сторон; в напорном трубопроводе В вода стоит на уровне 0-0 (под воздушным колпаком давление p будет несколько больше атмосферного, а уровень воды ниже уровня 0-0).

Включение тарана производится нажатием на пружину клапана К, при этом клапан опускается и в зазор устремляется вода под напором h . Вода пойдёт из бассейна по трубе А со скоростью v_0 . Затем, после опускания пружины закроется клапан К (натяжение пружины и вес клапана рассчитаны на равновесное, закрытое положение клапана при давлении $p_0 \geq \rho gh$).

Остановка движения воды вызовет в рабочей коробке с двумя клапанами повышение давления Δp , которое откроет клапан М и втолкнёт порцию воды в напорный трубопровод. Воздушный колпак перед трубопроводом выполнит при этом роль амортизатора, выравнивая давление. Одновременно повышенное давление будет со скоростью c распространяться по трубе А имеющей длину L и в момент времени L/c достигнет бассейна, где давление p_0 .

С этого момента вода под повышенным давлением Δp начнёт течь из трубы А в бассейн и от бассейна в сторону коробки тарана пойдёт волна с давлением p_0 .

В силу этого через время $\tau_0 = 2L/c$ движение воды в коробке тарана будет в обратную сторону при давлении p_0 . Клапан М закроется, давление в коробке начнёт падать до $p < p_0$ и вследствие этого клапан К откроется, пропуская в зазоры воду.

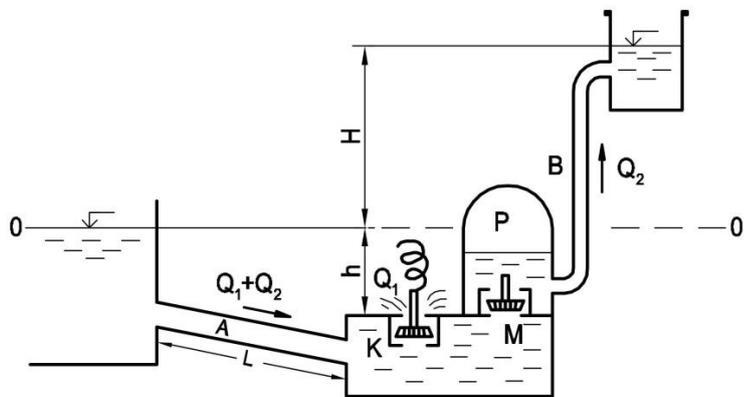


Рис. 2.19 Схема лабораторной установки для изучения гидравлического тарана

Так как в момент $\tau_0 = 3L/c$ к началу трубы А у бассейна подойдёт давление $p < p_0$, то вода снова пойдёт по трубе А к коробке, повышая давление до p_0 , при котором клапан К закроется. Снова произойдёт удар и вталкивание порции воды через клапан М. Таким образом, циклы смены давлений будут повторяться и таран будет непрерывно подавать воду по напорному трубопроводу В на высоту H . Такие водоподъёмные установки работают автоматически, не требуя осмотров и регулировок в течение длительного времени (многих месяцев). Произведение $\rho g Q_2 H$, так называемая “полезная энергия тарана”, значительно меньше затраченной подводимой энергии $\rho g (Q_1 + Q_2) h$.

Коэффициент полезного действия η тарана определяется из соотношения

$$\eta = \frac{Q_2 H}{(Q_1 + Q_2) h}, \quad (2.42)$$

где Q_1 и Q_2 - соответственно сбрасываемый и полезный расходы.

Цель лабораторной работы

Ознакомиться с работой тарана и определить его коэффициент полезного действия η .

Описание лабораторной установки

Работу проводят на установке (рис. 2.19), состоящей из трех основных частей: подводящей трубы А, рабочей коробки с двумя клапанами – ударным К и нагнетательным М и напорного трубопровода В. Для измерения расхода используют мерный бак или другой расходомер. Все геометрические размеры установки измеряют при ее изготовлении и указывают на схеме, которая приводится на испытательном стенде.

Состав лабораторной работы: Ознакомиться с работой тарана и определить опытным путём его коэффициент полезного действия η . Проведение 2, 3 опытов с разными высотами h от уровня воды в питающем бассейне до уровня ударного клапана тарана.

Порядок выполнения работы

Насосом воду подают в питающий бассейн и ждут установления постоянного уровня. Включают таран и измеряют объем воды в мерном баке и время его наполнения для определения Q_1 и Q_2 . Измеряют высоту h от уровня воды в питающем бассейне до уровня ударного клапана тарана. Измеряют разность уровней в верхнем и нижнем бассейнах, т.е. напор H . Результаты записывают в лабораторный журнал (табл. 2.14).

Для проведения следующего опыта устанавливают другой уровень в питающем бассейне. Измерения повторяют, результаты записывают в лабораторный журнал.

Порядок обработки результатов

Вычисляют: сбрасываемый расход $Q_1 = W_1/t_1$; полезный расход $Q_2 = W_2/t_2$; Коэффициент полезного действия тарана η

$$\eta = \frac{Q_2 H}{(Q_1 + Q_2) h}.$$

Контрольные вопросы

1. Возможна ли установка гидравлического тарана у любого водоёма?
2. Какое давление будет в рабочей коробке тарана и в начале трубы А в момент времени $3L/c$?
3. От чего зависит частота ходов ударного клапана?

Таблица 2.14

№№ п/п	Показатели	Един. измер.	Опыт		
			1	2	3
1	Объем воды в мерном баке, W_1	м ³			
2	Объем воды в мерном баке, W_2	м ³			
3	Время наполнения мерного бака t_1	с			

4	Время наполнения мерного бака t_2	с			
5	Расход воды, Q_1	$\text{м}^3/\text{с}$			
6	Расход воды, Q_2	$\text{м}^3/\text{с}$			
7	Высота, h	м			
8	Напор, H	м			
9	Коэффициент полезного действия тарана, η				

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Железняков Г.В., Неговская Т.А., Овчаров Е.Е. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока.- М.: Колос, 1984.- 205 с.
2. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. М.: КолосС, 2004, - 656 с.
3. Яковлева Л.В. Практикум по гидравлике. М.: ВО Агропромиздат, 1990, -143 с.
- 4.http://www.alfa-prom.ru/art_8_1_issled_rinka_malogab_dat_dav.html
Измерения давлений.
- 5.www.standartov.ru
Библиотека стандартов.
6. [www: do.gendocs.ru/Docs](http://do.gendocs.ru/Docs) В.И. Мясников Измерения расхода и объёма воды
Комплексный научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии Госстроя России (ГНЦ РФ НИИ ВОДГЕО) 2012.
7. [www:tehnorma.ru](http://www.tehnorma.ru) Способ измерения расходов воды с использованием ультразвуковых (акустических) измерителей ГОСТ Р 51657.5-2002.
8. <http://rudocs.exdat.com/docs/index-39966.html>
Методические указания Государственная система обеспечения единства измерений. Расход воды в реках и каналах. Методика выполнения измерений методом «скорость-площадь.» МИ 1759-87 Методические указания. ГСИ. Расход воды на реках и каналах. Методика выполнения измерений методом "скорость-площадь". / Государственный комитет СССР по стандартам; ВНИИР. - М.: Издательство стандартов, 1987 год

Оглавление

2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ	4
ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	4
2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ..	7
2.2. ИЗМЕРЕНИЕ МЕСТНЫХ СКОРОСТЕЙ ПОТОКА ТРУБКОЙ ПИТО-РЕБОКА.....	12
2.3. ДЕМОНСТРАЦИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ И ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИЙ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ	15
2.4.ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВОДОМЕРА ВЕНТУРИ	19
2.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ТРУБАХ	22
2.6. ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ	28
2.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУЛЬСАЦИИ СКОРОСТЕЙ И ДАВЛЕНИЙ ТЕНЗОДАТЧИКОМ.....	30
2.8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ ПО ДЛИНЕ ТРУБОПРОВОДА	33
2.9. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ.	39
2.10. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПОРЕ	43
2.11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА И СКОРОСТИ ПОТОКА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ ПРИ ЗАДАННОМ НАПОРЕ... ..	46
2.12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ УДАРЕ	50
2.13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТАРАНА	53
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	57

Учебное издание

ВАСИЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ФАРТУКОВ

ЗБОРОВСКАЯ МАРИНА ИЛЬНИЧНА

АЛЕКСЕЕВ ДАНИИЛ АНДРЕЕВИЧ

МЕТОДЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Учебное пособие

