

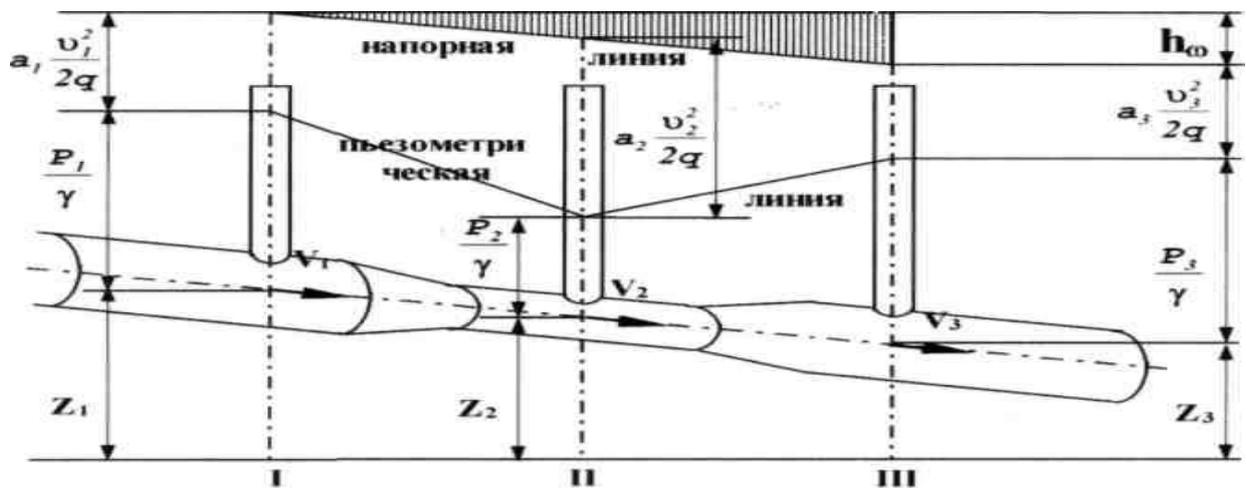
Министерство высшего и среднего специального образования республики Узбекистан

Наманганский инженерно-педагогический институт

Факультет: Строительство

Кафедра «Строительство инженерных коммуникаций»

Лабораторные работы по курсу Гидравлика



Наманган 2009 г



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ПРИБОРЕ РЕЙНОЛЬДСА.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Визуальное наблюдение ламинарного и турбулентного режимов движения.
2. Определение значения числа Рейнольдса при ламинарном и турбулентном режимах движения.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

При движении жидкости в трубопроводе возможны два режима течения - ламинарный и турбулентный.

Ламинарный режим характеризуется параллельно-струйным движением, при котором отдельные слои жидкости перемещаются, не смешиваясь между собой. Такое движение возникает при малых скоростях и малых сечениях потока жидкости, при движении по капиллярам, при движении вязких жидкостей (нефть, мазут, масла), при движении в порах фунта и т.д.

Для турбулентного режима характерно неупорядоченное, хаотическое движение, когда частицы жидкости перемещаются по сложным, всё время изменяющимся, траекториям. Вследствие наличия в турбулентном потоке поперечных к направлению движения составляющих скорости, в жидкости происходит интенсивное перемешивание. В инженерной практике при движении воды и других жидкостей малой вязкости (керосин, бензин, спирт и др.), в системах отопления, вентиляции, газоснабжения, теплоснабжения, водоснабжения чаще всего наблюдается турбулентный режим.

Потери напора существенно зависят от того, в каком режиме происходит движение. Чтобы в расчетах выяснить режим движения надо определить число Рейнольдса и сравнить его с критическим значением.

Числом Рейнольдса  $Re$  называют безразмерный комплекс, составленный из размерных величин: скорости, характерного линейного размера живого сечения и вязкости.

Существование двух режимов движения жидкости было наглядно показано английским физиком О. Рейнольдсом. Опыты Рейнольдса, подтвержденные позднее другими учеными, показали, что критерием для определения режима движения жидкости в круглой трубе является выражение:

$$R_e = \frac{vd}{\nu}$$

где:  $Re$  - безразмерный критерий, называемый числом Рейнольдса:

$v$  - средняя скорость движения жидкости, см/с;

$d$  - диаметр трубы, см;

$\nu$  - кинематический коэффициент вязкости, см<sup>2</sup>/с;

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}; \quad \eta - \text{динамическая вязкость, Пас};$$

Значение числа Рейнольдса, при котором происходит переход от ламинарного режима к турбулентному, называется критическим числом Рейнольдса -  $Re_{кр}$

При  $Re < Re_{кр}$  режим движения является ламинарным, при  $Re > Re_{кр}$  турбулентным.

В определённом диапазоне чисел  $Re$  существует неустойчивая область, где возможны оба режима в зависимости от характера изменения скоростей. Величина критического числа  $Re_{кр}$  зависит от ряда обстоятельств: условий входа в трубу, шероховатости стенок трубы, отсутствия или наличия первоначальных возмущений и т.д. и может принимать в каждом случае различные значения.

Для круглых труб обычно принимают  $Re_{кр} = 2320$ . Скорость, при которой турбулентный режим переходит в ламинарный режим движения жидкости, называется критической скоростью.

При  $Re_{кр} \leq 2320$  - режим ламинарный.

При  $Re_{кр} > 2320$  - режим турбулентный.

При турбулентном движении жидкости потери напора  $h_w$  с увеличением скорости нарастают быстрее, чем при ламинарном.

Если при ламинарном режиме потери напора пропорциональны скорости в первой степени:  $h_w = k_1 \nu$ , то при турбулентном  $h_w = k_2 \nu^n$ , где  $k_1$   $k_2$  - коэффициенты пропорциональности, а  $n = 1,75 \dots 2$ .

## ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Опытная установка (рис 1.1) состоит из напорного бака (1); в который по трубопроводу поступает вода из водопроводной сети. Для поддержания постоянного уровня воды в баке имеется водослив. Внутри бака установлена решётка, служащая для успокоения поступающей в него воды, и термометр для измерения температуры воды.

К баку (1) присоединена стеклянная трубка (4), в конце которой установлен вентиль (5) для регулирования скорости движения воды. Расход воды определяется с помощью мерного бака (6). Установка имеет небольшой бачок (2) для красителя с трубкой (7) и краником (3).

В опыте режим движения наблюдается в основной стеклянной трубке (4) при введении в основной поток красителя. Изменение режима достигается путём регулирования расхода жидкости через трубу с помощью вентиля (5).

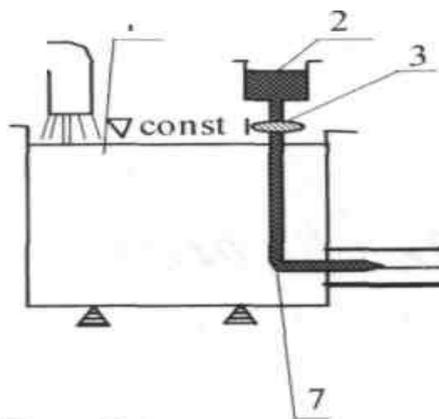


Схема опытной установки.

- 1 Напорный бак :
- 2 Бачок для красителя :
- 3. Краник ;
- 4. Стекло́нная труба; (d = 2.5 см)
- 5. Регулировочный вентиль
- 6. Мерный бак
- 7.Трубка с цветной жидкости

### ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

- 1 При закрытых кранах заполняют напорный бак (1) водой.
- 2 Незначительным открытием вентиля (5) устанавливают в трубе (4) расход жидкости, при котором имеет место медленное течение.
- 3 Приоткрыв краник (3), вводят в основной поток краситель. Наблюдают характер движения жидкости в стеклянной трубе. Струйчатое движение краски будет свидетельствовать о наличии ламинарного режима. Постепенно увеличивают открытие крана (5) и наблюдают изменение режима движения с увеличением скорости. Сначала подкрашенная струйка приобретает волнистый характер и ламинарный режим становится неустойчивым. При дальнейшем увеличении скорости цветная струйка исчезает, вся жидкость равномерно окрашивается-ламинарный режим движения перешел в турбулентный. При установившемся движении определяется расход воды в трубе, для каждого режима движения определяется объём поступившей в мерный бак воды за время I, одновременно регистрируется температура воды.

### ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

- 1 Кинематический коэффициент вязкости  $\nu$  определяют из таблицы.

Таблица 1.1

Температура воды в град. °C	0	5	10	15	20	25
Кинемат. коэф. вязкости $\nu$ , см <sup>2</sup> /с	0,0173	0,015	0,0131	0,0114	0,0102	0,0090

Для пресной воды зависимость кинематического коэффициента от температуры определяется по формуле:

$$\nu = \frac{0,01775}{1+0,0337 t+0.000221 t^2}$$

где  $\nu$  - коэффициент вязкости, ст;



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Определение опытным путём значений потенциальной энергии (пьезометрического напора), удельной кинетической энергии (скоростного напора) и полной удельной энергии (гидродинамического напора) в различных сечениях потока.
2. Построение на основе опытных данных пьезометрической и напорной линий для трубопровода переменного сечения.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Уравнение Бернулли для установившегося потока реальной жидкости является частным случаем закона сохранения энергии. Любой движущийся поток жидкости обладает определённой энергией. Эта энергия может быть проявлена в трех формах: в виде энергии положения, энергии давления и кинетической энергии. Соотношение между отдельными видами энергии для движущегося потока устанавливается уравнением Бернулли.

Для потока реальной жидкости при установившемся движении уравнение Бернулли имеет следующий вид для двух произвольных сечений:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w$$

где  $Z_1, Z_2$  - вертикальные центры тяжести сечений

$P_1, P_2$  - давление в центрах тяжести;

$V_1, V_2$  - средние скорости потока;

$\alpha_1, \alpha_2$  - коэффициенты кинетической энергии, учитывающие неравномерности распределения скоростей по живому сечению потока.

В практических расчётах при турбулентном движении коэффициент кинетической энергии можно принимать равным 1,0 - 1,1.

Первый член приведенного уравнения определяет высоту положения центра тяжести живого сечения потока над произвольной горизонтальной плоскостью сравнения 0-0 (рис. 2.1) и называется геометрической высотой или геометрическим напором; он характеризует удельную потенциальную энергию положения.

Второй член  $\frac{P}{\rho g}$  — представляет собой высоту столба жидкости, соответствующую гидродинамическому давлению в данной точке живого сечения потока и называется пьезометрической высотой, величина его характеризует удельную потенциальную энергию давления.

Сумма геометрической и пьезометрической высот  $Z + \frac{P}{\rho g}$  называется пьезометрическим напором, величина которого определяет общий запас удельной потенциальной энергии.

Третий член уравнения  $\frac{\alpha v^2}{2g}$  называется скоростным напором, который определяет запас удельной кинетической энергии.

Сумма  $Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$  представляет величину полной удельной энергии потока и называется гидродинамическим напором  $H$ .

Последний член в правой части уравнения  $h_w$  выражает сухарную потерю напора (энергии) на преодоление гидравлических сопротивлений при движении жидкости между рассматриваемыми сечениями. Изменение гидродинамического напора (полной энергии) в живых сечениях по длине потока относительно произвольно выбранной плоскости сравнения характеризуется напорной линией. Напорная линия строится по сумме трёх членов уравнения Бернулли. Так как часть полной удельной энергии затрачивается на преодоление гидравлических сопротивлений, то напорная линия может также понижаться от сечения к сечению.

Для трубопровода постоянного сечения (рис. 2.1а) кинематические характеристики потока постоянны по его длине,  $\alpha_1 = \alpha_2$ ,  $v_1 = v_2$ , поэтому скоростной напор имеет одинаковую величину во всех сечениях  $\frac{\alpha v^2}{2g} = \text{const}$  тогда из уравнение Бернулли получим:

$h_w = (Z_1 + \frac{P_1}{\rho g}) - (Z_2 + \frac{P_2}{\rho g})$  то есть потеря напора на трение равна уменьшению удельной потенциальной энергии (пьезометрического напора) потока и выражается перепадом пьезометрических уровней в начальном и конечном сечениях трубопровода.

Поскольку потери на трение пропорциональны длине участка, то напорная и пьезометрическая линии в этом случае представляют собой параллельные опускающиеся прямые.

В трубопроводе переменного сечения при движении жидкости происходит преобразование одного вида энергии жидкости в другой, которое сопровождается изменением скорости вдоль потока. Пьезометрическая линия в этом случае может понижаться (при увеличении скорости). Если живое сечение уменьшается по направлению движения, то кинетическая энергия растёт за счёт уменьшения потенциальной энергии. И наоборот, если живое сечение потока увеличивается, то кинетическая энергия уменьшается, а потенциальная растёт.



## ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Опытной установка для изучения уравнения Бернулли (рис.2.2) состоит из напорного бака (1), 'заполняемого из водопроводной сети через кран (5). трубопровода с горизонтальной осью (2) переменного сечения с диаметрами Э и с] и мерного бака (7). Постоянный горизонт воды в баке поддерживается с помощью водослива (4). Благодаря постоянству уровня в баке (1) движения жидкости в трубе будет установившимся. В шести характерных сечениях трубопровода установлены пьезометры (3), нуль, шкалы которых совпадает с осью трубы. По показаниям пьезометров определяются пьезометрические напоры в сечениях I-IV. Расход определяется объемным способом по уровню воды в мерном баке.

### ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

1. Напорный бак (I) заполняется водой.
2. Проверяется отсутствие воздуха в пьезометрах.
3. При некотором открытии крана (6) добиваются установившегося движения жидкости в трубе, свидетельством чего является неизменность уровня воды в пьезометрах.
4. Для данного режима движения замеряют объём жидкости ДУ, поступивший в мерный бак (7) за время опыта t
5. Одновременно с замером объёма жидкости снимают показания пьезометров(3)
6. Результаты замеров заносятся в таблицу 2.1.

Вертикальное расстояние Z от оси трубопровода до плоскости сравнения принимают в расчётах  $Z = 70$  см,  $d=1,6$  см,  $D=2,5$  см.

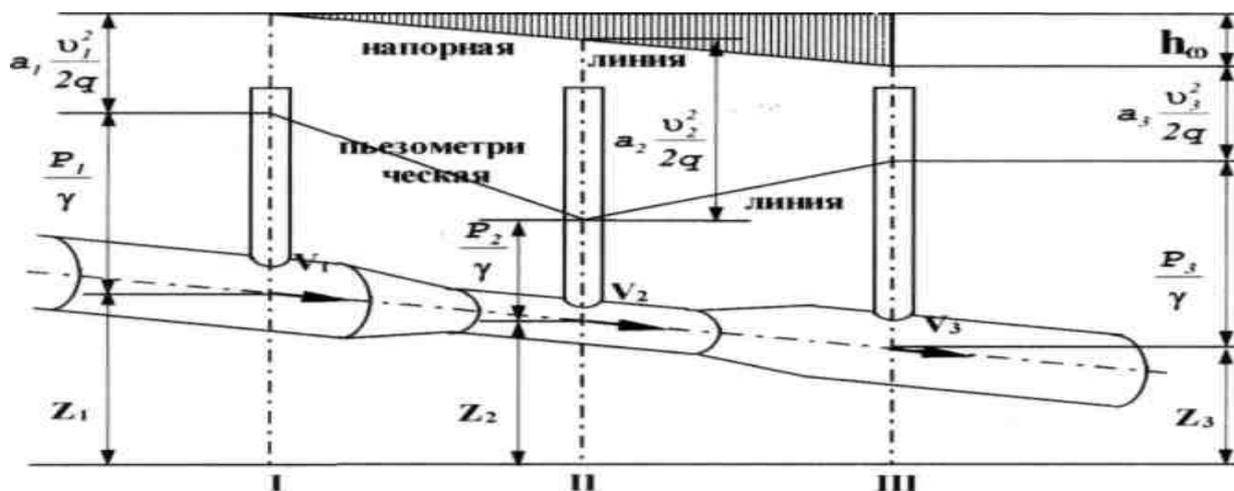


Рис. 2.1

Таблица 2.1

№	Объем W	Время t	Расход Q	Живые сечения, см <sup>2</sup>	Средняя скорость в сечениях	Показания пьезометров см

	см <sup>3</sup>	сек	см <sup>3</sup> /сек	$\omega_{1,2,3,5,6}$	$\omega_4$	$\vartheta_{1,2,3,5,6}$	$\vartheta_4$	1	2	3	4	5	6
1													
2													
3													

Таблица 2.2

№	$E_i = Z + \frac{P}{\rho g}, \tilde{m}$						$E_k = \frac{\alpha \vartheta^2}{2g}, \tilde{m}$			$H = Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha v_i^2}{2g}, \tilde{m}$						$h_n = H_{T1} - H_i$					
	1	2	3	4	5	6	1,2,3	4	5,6	1	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6	
1																					
2																					
3																					

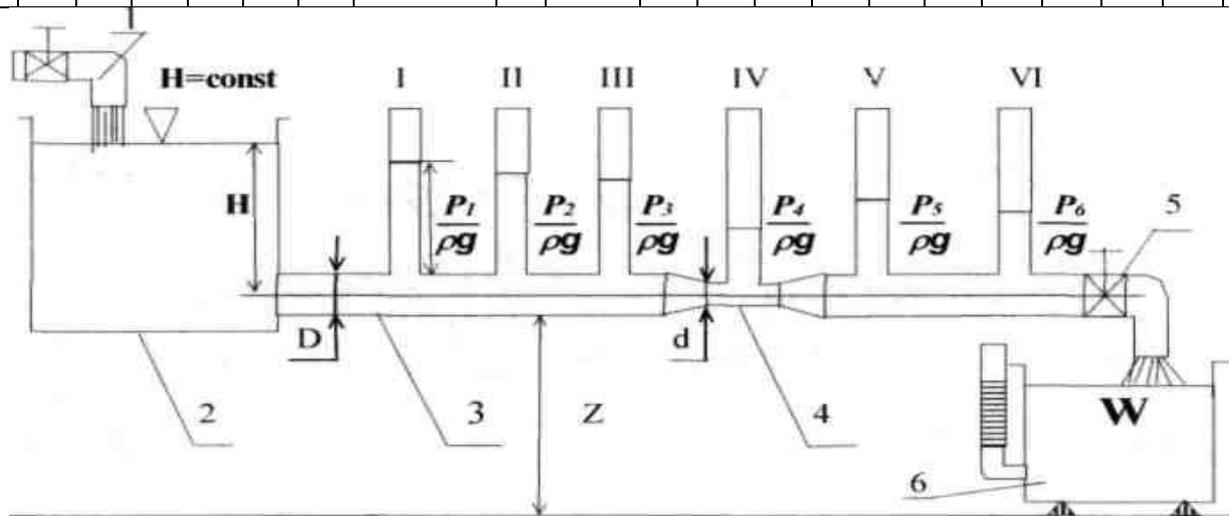


Рис. 2.2. Схема опытной установки.

I - Сетевой вентиль; 2 - Напорный бак; 3 - Трубопровод; Труба Вентури; 5 - Регулировочный вентиль; 6 - Мерный бак; I - VI - Пьезометры

1. Расход жидкости  $Q = \frac{W}{t} \left[ \frac{\tilde{m}^3}{\tilde{m}^3} \right]$

Средние скорости в каждом сечении потока:  $\vartheta = \frac{Q}{\omega} \left[ \frac{\tilde{m}}{\tilde{m}^2} \right]$  где  $\omega$  площадь живого сечения

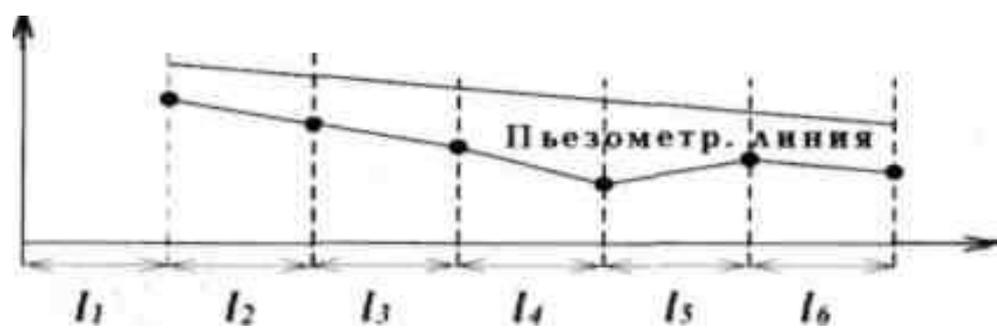
трубопровода  $\omega = \frac{\pi d^2}{4} \left[ \frac{\tilde{m}^2}{\tilde{m}^2} \right]$

2. Удельная потенциальная, кинетическая и полная энергии соответственно:  $E_p, E_k, H_n$ , см

3. Потери удельной энергии  $H_{III} - H_n$ .

$H_n$  - полная удельная энергия в 1-ом сечении,  $H_{III}$  - полная удельная энергия в i-ом сечении, Результаты измерений заносятся а таблицу 2.2.

4. На миллиметровой бумаге вычерчивается схема трубопровода и на неё в масштабе наносится пьезометрическая и напорная линии. Смотреть рисунок 2.3.- образец



**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**  
**ТАРИРОВАНИЕ РАСХОДОМЕРА ВЕНТУРИ.**

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

1. Освоение методики измерения расхода воды трубой Вентури.
2. Тарировка расходомера и построение тарировочного графика

**КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

Для измерения расхода жидкости (газа), равномерно движущейся в напорном трубопроводе, используют специальные устройства - сопла, диафрагмы, трубы Вентури.

Применение этих устройств основано на существовании определённой зависимости между перепадом давления (создаваемым в потоке в результате сужения проходного сечения трубы) и расходом жидкости. Для каждого конкретного сужающего устройства эта зависимость может быть найдена из основных уравнений гидромеханики: уравнения Бернулли и уравнения неразрывности потока.

Расходомер Вентури представляет собой трубу переменного сечения, состоящую из двух участков - плавно сужающегося и постепенно расширяющегося. Скорость потока в суженном месте возрастает, а давление падает. Возникает разность (перепад) давлений, которая измеряется парой пьезометров, устанавливаемых в начале конуса и на цилиндрическом участке.

Теоретический расход жидкости в трубопроводе может быть определён по формуле:

$$Q = \vartheta_4 \omega_4 = \sqrt{\frac{2gH}{1 - \left(\frac{\omega_4}{\omega_3}\right)^2}} \omega_4$$

где  $\Delta h = \frac{P_3}{\rho g} - \frac{P_4}{\rho g}$  или  $Q = C\sqrt{\Delta h}$

где  $C$  - величина, постоянная для данного расходомера и равная

$$C = \sqrt{\frac{2g}{1 - \left(\frac{\omega_4}{\omega_3}\right)^2}} \omega_4$$

Зная величину  $C$  и наблюдая за показаниями пьезометров, можно определить

расход в трубопроводе для любого момента времени по формуле:  $Q = \tilde{n}\sqrt{\Delta h}$

Для стандартных расходомеров коэффициенты сопротивлений и постоянные расходомеров приводятся в специальных справочниках. Константу  $C$  также можно подсчитать теоретически, но точнее она определяется из эксперимента, т.е. в результате тарировки расходомера. При тарировании результаты опытов удобно представить в виде

графика зависимости  $\Delta h = f(Q)$

В этом случае можно определять расход непосредственно по графику, не прибегая к расчётам.

### ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (Рис.3.1) включает: напорный бак (1), трубопровод (2), в конце которого установлен кран (6), мерный бак (7). В средней части трубопровода смонтирована труба Вентери. Для замера перепада давления к расходомеру присоединены пьезометры (3) и (4). Постоянный напор в баке поддерживают с помощью водослива (5).

### ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

1. Напорный бак (1) заполняется водой.
2. Проверяется отсутствие воздуха в пьезометрах.
3. С помощью вентиля (6) в трубопроводе устанавливаются разные расходы воды и для каждого опыта замеры показаний пьезометров.

$$h_3 = \frac{P_3}{\rho g} \quad h_4 = \frac{P_4}{\rho g}$$

4. Одновременно определяется количество поступившей в мерный бак воды  $W$  за время опыта  $t$ . Данные измерений заносятся в таблицу.

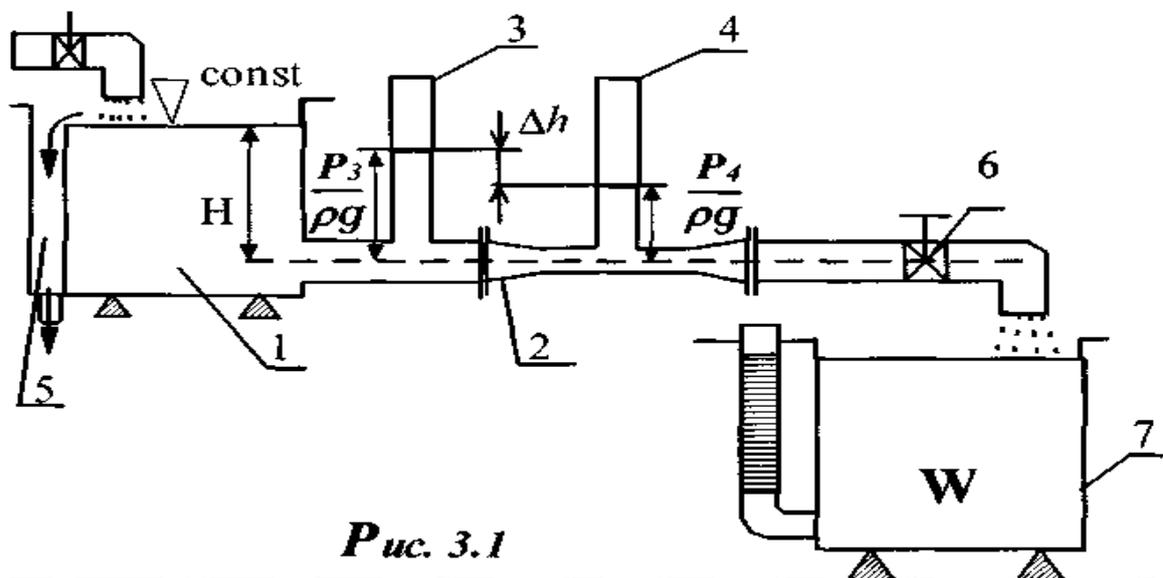


Рис. 3.1

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ.

1. Вычисляется действительный расход жидкости

$$Q = \frac{W}{t} \left[ \frac{\text{см}^3}{\text{сек}} \right]$$

2. определяется разность показаний пьезометров (3) и (4).

$$\Delta h = h_3 - h_4$$

3. Вычисляется постоянная расходомера  $C = \frac{Q}{\sqrt{\Delta h}}$

**Результаты вычислений заносятся в таблицу**

Таблица 3.1

№	Данные измерений				Расчёты			
	W	t	h <sub>3</sub>	h <sub>4</sub>	Q	Δh	C	C <sub>ср</sub>
	см <sup>3</sup>	сек	см	см	см <sup>3</sup> /с	см	см <sup>2,5</sup> /с	см <sup>2,5</sup> /с
1								
2								
3								

4. По результатам опытов строится тарировочный график  $\Delta h = f(Q)$

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ ПО ДЛИНЕ.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Определение опытным путём коэффициента гидравлического трения  $\lambda$ , для различных режимов движения жидкости.
2. Определение области сопротивления, выбор расчетных формул для вычисления величины коэффициентов гидравлического трения в зависимости от режима движения жидкости.
3. Сравнение результатов экспериментального определения коэффициентов гидравлического трения с вычисленными по расчетным формулам.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Равномерно движущийся в трубе поток жидкости теряет часть энергии вследствие трения о поверхность трубы, а также внутреннего трения в самой жидкости. Эти потери носят название потерь напора на трение по длине потока.

В соответствии с уравнением Бернулли потери напора по длине определяются как разность полных удельных энергий в двух сечениях рассматриваемого участка трубопровода и для горизонтальной трубы постоянного диаметра могут быть выражены в виде:

$$h_e = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}$$

где  $\frac{P_1}{\rho g}$  и  $\frac{P_2}{\rho g}$  - пьезометрические напоры в соответствующих сечениях потока.

Уравнение (I) является основным при опытном определении потерь напора на трение.

Для расчёта потерь напора на трение при движении жидкости по трубам пользуются формулой Дарси - Вейсбаха:

$$h_e = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$$

где  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения;

$v$  - средняя скорость движения жидкости;

$l$  - длина трубопровода;

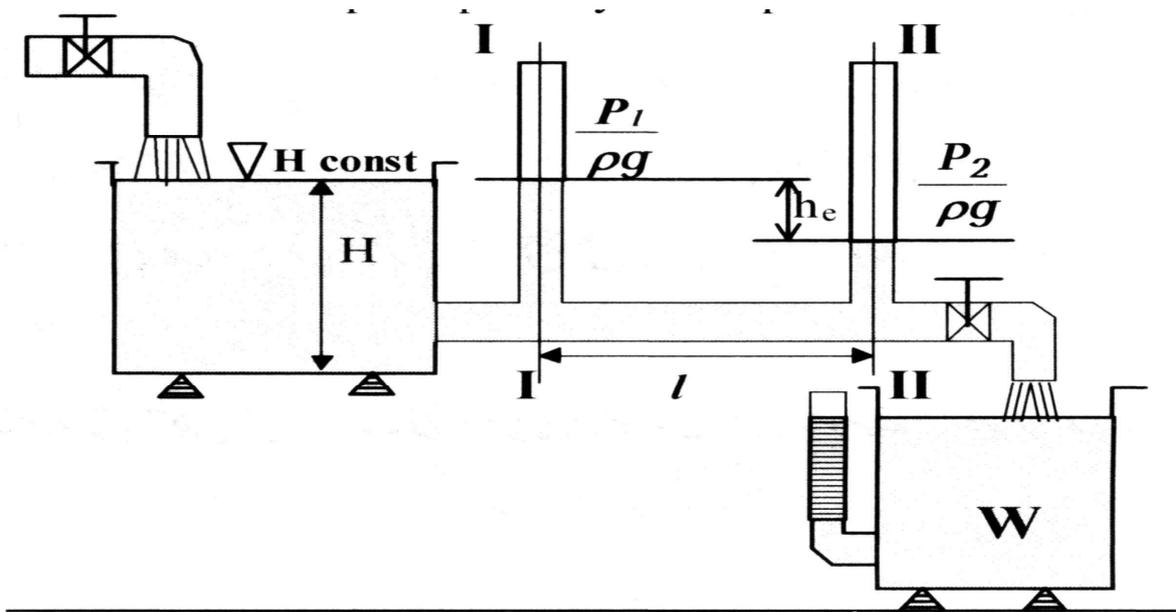
$d$  - диаметр трубопровода;

$g$  - ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Формула (2) справедлива для различных режимов движения жидкости. Однако значения коэффициентов  $\lambda$  для ламинарного и турбулентного режимов будут различны и в общем случае  $\lambda$  будет также зависеть от относительной шероховатости стенок трубы, то есть

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

где  $\lambda$  - абсолютный размер выступов шероховатости.



Коэффициент  $\lambda$  определяется на основе опытных данных или по известным эмпирическим зависимостям. Опытом установлено, что при ламинарном течении шероховатость не оказывает влияния на сопротивление движению. Коэффициент  $\lambda$  в этом случае зависит только от числа Рейнольдса и может быть вычислен по формуле

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$$

Потери напора при ламинарном потоке пропорциональны скорости в первой степени:

$$h_e = k\vartheta$$

В турбулентном потоке у стенок образуется тонкий слой жидкости с ламинарным режимом. Основная масса жидкости (ядро потока), в котором движение турбулентное, связана с этим слоем переходной зоной. Совокупность ламинарного слоя и переходной зоны называют пограничным слоем. Толщина пограничного слоя измеряется долями мм. обозначается  $\delta$  и зависит от числа Рейнольдса.

Пока средняя величина выступов, образующих шероховатости поверхности трубы

(абсолютная эквивалентная шероховатость  $\lambda$ , меньше толщины пограничного слоя  $Re$ ). Турбулентный поток не входит в непосредственный контакт с выступами, шероховатость не влияет на величину потерь напора. Такие поверхности называются гидравлически гладкими.

С увеличением  $Re$  толщина пограничного слоя уменьшается и становится меньше выступов шероховатости ( $\Delta > \delta$ ). Выступы входят в турбулентное ядро потока и увеличивают потери напора. Такие поверхности называют гидравлически шероховатыми.

Для характеристики влияния шероховатости на величину потерь введите понятие эквивалентной относительной шероховатости  $\Delta = \frac{\Delta}{d}$ , где  $d$  - диаметр трубы.

Зависимость коэффициента гидравлического трения от шероховатости и  $Re$  для труб с естественной шероховатостью (технические трубы) представлена на рис. 4.1. (график Никурадзе).

Первая зона - зона ламинарного режима, она представлена прямой 1-2-3

Вторая зона - зона, покрытая наклонной штриховкой, является зоной неустойчивого режима. Здесь числа Рейнольдса лежат в пределах от 1000 - 2300 до 4000.

Третья зона - зона турбулентного режима. Эта зона располагается правее вертикали III, отвечающей  $Re = 4000$ . Данная зона в свою очередь разбивается на три области сопротивления:

1) область гидравлически гладких труб - прямая с постепенным переходом в кривую для относительной шероховатости  $\Delta = 0,000005$  при  $Re = 105$ . В этой области  $\lambda$  зависит только от числа Рейнольдса и определяется по формуле Блазиуса:  $\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$

2) область квадратичного сопротивления на графике располагается между линиями I и II.

Для определения используется формула Альтшуля:  $\lambda = 0.11 \left( \Delta + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}$

3) область квадратичного сопротивления (автомодельная) на графике эта область располагается правее линии II. В этой области потери напора на трение пропорциональны и коэффициент гидравлического трения вычисляется по формуле Шифринсона:

$$\lambda = 0.11(\Delta)^{0.25}$$

Все изложенное выше удобно обобщить в таблице 4.1.

## ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Опытная установка (рис.4.2) состоит из бака (1) от которого отходит трубопровод (2) диаметром  $d=2,5$  см. Трубопровод имеет прямолинейный участок длиной  $l=170$  см. В начале и конце участка установлены пьезометры (5). В баке установлен водослив (3), поддерживающий постоянный напор. В конце трубы установлен мерный бак (7). Регулирование расхода воды производится кранами (4) и (6).

### ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

1. Напорный бак заполняется водой до постоянного уровня.
2. Открытием вентиля в трубопроводе устанавливается режим течения, соответствующий минимальному в опыте расходу жидкости. Рекомендуется провести опыты не менее 3-раз при разных открытиях крана (6).
3. Для каждого режима определяются:
  - а) Объём, поступивший в мерный бак  $W$  за время опыта  $t$ .
  - б) Показания пьезометров  $h_1$  и  $h_2$

### ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Потери напора на выделенном участке определяется из уравнения Бернулли, составленного для сечений 1-1 и Н-П.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_e$$

$$Z_1 = Z_2, \vartheta_1 = \vartheta_2, h_e = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}$$

2. Расход и скорость (средняя) движения жидкости в трубопроводе

$$Q = \frac{W}{t} \left[ \frac{\text{см}^3}{\text{сек}} \right], \quad \vartheta = \frac{Q}{\omega} \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}} \right]$$

4. Для определения коэффициента сопротивления применяется формула Дарси-Вейсбаха:

$$\lambda_T = h_e \frac{d}{l} \frac{2g}{\vartheta^2}$$

где,  $d$  - диаметр трубопровода - 2,5 см

$l$  - длина трубопровода - 170 см.

4. Для определения области сопротивления подсчитываются числа  $R_e$

$$R_e = \frac{v d}{\nu}$$



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Определить опытным путём значения коэффициентов местных сопротивлений.
2. Сравнить полученные значения коэффициентов с результатами вычислений по теоретическим формулам или приведёнными в справочниках.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Одним из важнейших вопросов прикладной гидравлики является определение потерь энергии при движении жидкости по трубопроводу является потеря энергии в местных сопротивлениях.

Местные гидравлические сопротивления - это такие элементы трубопроводов, в которых вследствие изменения размеров или конфигурации русла происходит изменение скорости потока, отрыв транзитной струи от стенок русла и возникают вихреобразования. Местные сопротивления встречаются во всех гидравлических системах. Чаще всего - это различная запорная арматура (краны, задвижки и т.д.), расширение и сужение сечений потока, повороты, колена и др.

Потери энергии в конечном счете обусловлены вязкостью жидкости, а следовательно, теряемая механическая энергия рассеивается и переходит в тепловую.

Для вычисления потерь напора, вызванных местными сопротивлениями, используют

формулу, 
$$h_M = \xi \frac{\gamma^2}{2g}$$

где  $h_M$  - потеря напора на местное сопротивление, см;

$\gamma$  - средняя скорость движения потока, см/с;

$\xi$  - коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент местного сопротивления, существенно зависит от вида местного сопротивления, его геометрической формы, скорости течения жидкости, её плотности, вязкости, а также от диаметра трубы, по которой движется поток. Этот коэффициент обычно определяют опытным путём.

1. Для резкого расширения потока (рис.5а) величина потерь напора может быть получена теоретически по формуле Борда:

$$h_{pp} = \frac{v_d - v_D}{2g}$$

где  $h_{pp}$  - потери напора при резком расширении, см;

$v_d$  - средняя скорость движения жидкости до расширения, см/с

$v_D$  - то же после расширения.

После преобразования эта формула имеет вид:

$$h_{pp} = \xi_{pp} \frac{v^2}{2g} \quad \text{где} \quad \xi = \left( \frac{\omega_d}{\omega_D} - 1 \right)^2$$

$\omega_d$  - площадь живого сечения до расширения, см<sup>2</sup>

$\omega_D$  - площадь живого сечения после расширения, см<sup>2</sup>



2. Для резкого сужения потока (рис.5, б)

$$h_{pc} = \xi_{pc} \frac{v^2}{2g}$$

Значения коэффициента местного сопротивления при резком сужении теоретически определяется по формуле

$$\xi_{pc} = 0.5 \left( 1 - \frac{\omega_d}{\omega_D} \right)$$

Для пробкового крана коэффициент местного сопротивления зависит от его конструкции и степени открытия. Значения коэффициентов  $\xi_{кр}$  в зависимости от угла поворота пробкового крана приведены в таблице 5.1.

таблица 5.1

угол поворота	5	10	20	30	40	50	60	65
коэфф.сопр.	0,05	0,029	1,56	5,47	17,3	52,6	206	485

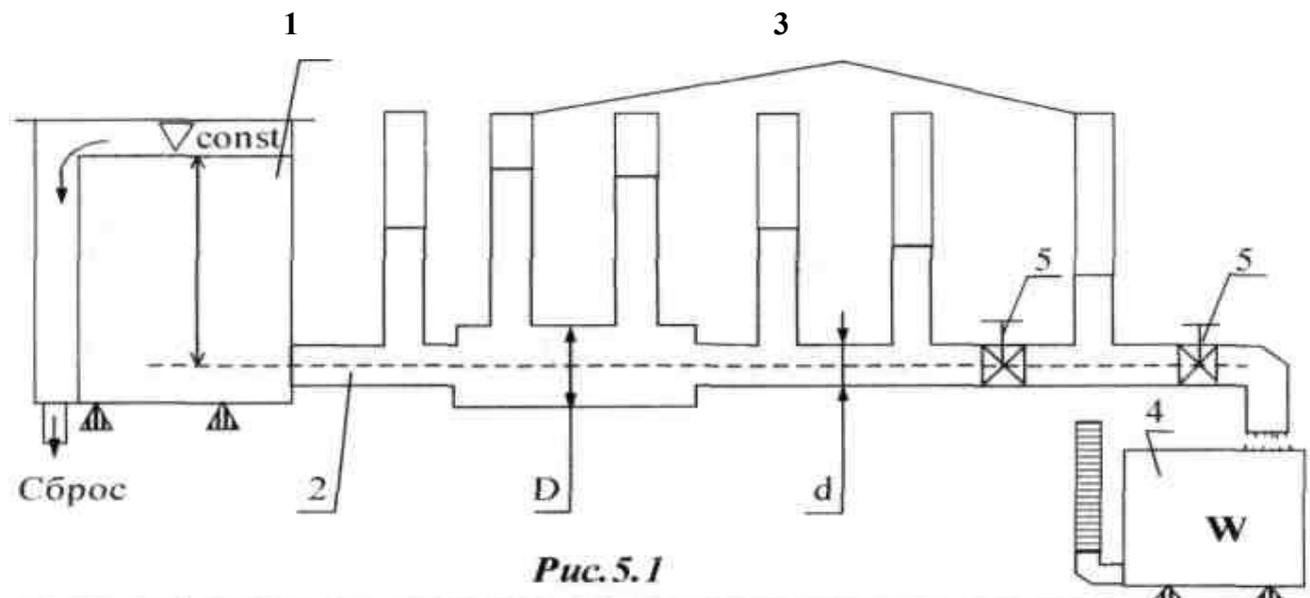
### ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Опытная установка (рис. 5.1) состоит из бака (1), от которого отходит труба (2). Уровень воды в баке поддерживается постоянным с помощью водослива. На трубопроводе находятся местные сопротивления в виде резкого расширения (1), резкого сужения (2),

крана (5). До и после каждого местного сопротивления установлены пьезометры (3). В конце трубопровода устанавливается мерный бак (4).

### ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ.

При открытии крана (5) устанавливают расход жидкости в трубопроводе. По достижении установившегося движения жидкости до и после местного сопротивления измеряют пьезометрический напор, а также определяют объем воды в мерном баке (4) и время его наполнения. Результаты записывают в таблицу. Опыты проводят не менее трёх раз при различном расходе жидкости, который регулируют краном (5).



### ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Расход воды и среднюю скорость её движения определяют следующим способом:

$$Q = \frac{W}{t} \left[ \frac{\text{см}^3}{\text{сек}} \right]; \quad v_d = \frac{Q}{\omega_d}; \quad v_B = \frac{Q}{\omega_B}; \quad \text{где } \omega_d = \frac{\pi d^2}{4}; \quad \omega_B = \frac{\pi D^2}{4}$$

здесь  $d$  - диаметр трубопровода до расширения;

$D$  - то же после расширения;

Затем определяются потери напора в местных сопротивлениях. Для этого применяют уравнение Бернулли:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1}$$

$Z_1 = Z_2$  так как трубопровод горизонтальный, то

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1}$$

Потери между сечениями:  $h_{w1-2} = h_e + h_M$

где  $h_e$  -потери напора по длине;

$h_M$  -то же на местное сопротивление.

Так как потери по длине очень малы, то

$$h_{w1-2} = h_M = \left( \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left( \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right)$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 10 \quad h_M = E_1 - E_2 \quad \text{здесь} \quad E = \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad \text{полная удельная энергия}$$

потока. Поскольку для крана  $v_1 = v_2 = v_d$ ,  $h_{кр} = \frac{P_5}{\rho g} + \frac{P_6}{\rho g}$

Потери напора при расширении и сужении трубопровода определяются разностью полных удельных энергий до местного сопротивления и после.

$$h_{pp} = E_1 - E_2 = \left( \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_d^2}{2g} \right) - \left( \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_D^2}{2g} \right); \quad h_{pc} = E_3 - E_4 = \left( \frac{P_3}{\rho g} + \frac{v_D^2}{2g} \right) - \left( \frac{P_4}{\rho g} + \frac{v_d^2}{2g} \right)$$

Производят расчёт опытных значений коэффициентов местных сопротивлений по формуле:

$$\xi = \frac{h_M 2g}{v^2}$$

Рассчитывают теоретические значения коэффициентов местных сопротивлений и сравнивают с опытными. Результаты заносятся в таблицу.



**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6**  
**ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ МАЛОЕ ОТВЕРСТИЕ В**  
**ТОНКОЙ СТЕНКЕ**  
**ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Исследовать характеристики истечения, определить опытным путем значения коэффициентов сжатия  $\epsilon$ , скорости  $\varphi$ , местного сопротивления, расхода, характеризующих истечение жидкости через малое отверстие в тонкой стенке.

**КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СЪЕДЕНИЯ**

Отверстие считается малым, если диаметр его  $d < 0.1 H$ , где  $H$ -напор над центром отверстия.

Тонкой стенкой считается такая, толщина которой  $\delta < 3 d_{\text{отв}}$  не влияет на характер истечения жидкости из отверстия, а так же стенка, края которой в отверстии имеют острую кромку.

Вследствие того, что жидкость подходит к круглому отверстию со всех сторон, линии тока в начале струи оказываются криволинейными и, пройдя плоскость отверстия, продолжают приближаться к оси струи. По этой причине струя на выходе из отверстия сжимается и на расстоянии равном  $(0,5 \div 0,1) d_{\text{отв}}$  приобретает сжатие, это сечение называется сжатым сечением.

Степень сжатия струи определяется коэффициентом сжатия

$$\epsilon = \frac{\Omega_{\text{сж}}}{\Omega}$$

где  $\Omega_{\text{сж}}$  - площадь сжатого сечения,

$\Omega$  - площадь отверстия.

Средняя скорость в сжатом сечении струи определяется по формуле

$$v = \sqrt{2 g H} ; \quad \varphi = \sqrt{\frac{1}{\alpha + \xi}}$$

где  $\varphi$  - коэффициент скорости, учитывающий уменьшение теоретического значения скорости  $v_T = \sqrt{2gH}$  вследствие наличия сопротивлений при истечении и представляет

собой отношение действительной скорости к теоретической  $\varphi = \frac{v}{v_T}$

$\xi$  - коэффициент местного сопротивления,

$\alpha$  - коэффициент Кориолиса в сжатом сечении,  $\alpha = 1,0$ .

Действительная скорость  $v$  определяется из уравнения траектории падения струи (параболы).

$$v = X \sqrt{\frac{Y}{2Y}}$$

"X" и "Y" - координаты произвольных точек струи относительно начала координат, совпадающего с центром тяжести сжатого сечения.

Зная коэффициент скорости  $\varphi$ , можно определить коэффициент местного сопротивления

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

Расход жидкости через малое отверстие в тонкой стенке

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

где  $\omega$  - площадь отверстия,

$\mu$  - коэффициент расхода равный отношению действительного расхода к расходу теоретическому, т.е. полученному без учета сопротивления и сжатия струи:

$$\mu = \frac{Q}{Q_T} \quad \text{или} \quad \mu = \varepsilon \varphi$$

$$\text{где} \quad Q_T = \omega \sqrt{2gH}$$

По данным опытов для малых отверстий в тонкой стенке при совершенном сжатии  $\varepsilon = 0,64$ ;  $\xi = 0,06$ ;  $\varphi = 0,95$ ;  $\mu = 0,62$ .

### ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Опытная установка (рис 6,1а) состоит из напорного бака (1), в котором поддерживается постоянный уровень с помощью водослива. Напорный бак соединен вертикальной трубой с баком меньшего объема (3), в стенке которого имеется отверстие  $d_{отв} = 1.1$  см с острыми кромками. Напор над центром отверстия измеряется пьезометром (4).

Меняя открытия крана (2), устанавливают различные напоры над центром отверстия.

Для определения действительной скорости измеряют координаты падающей струи. Для определения горизонтальной координаты "X" установлена рейка с делениями (5). При



