

Лабораторная работа № 1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ.

Цель работы - ознакомление с методикой экспериментального определения гидравлических потерь напора при истечении жидкости через отверстия и насадки.

Главная задача об истечении – установление зависимости между напором истечения и скоростью (или расходом) струи, вытекающей из отверстия или насадка.

1. ОБЩИЙ ВИД СТЕНДА.

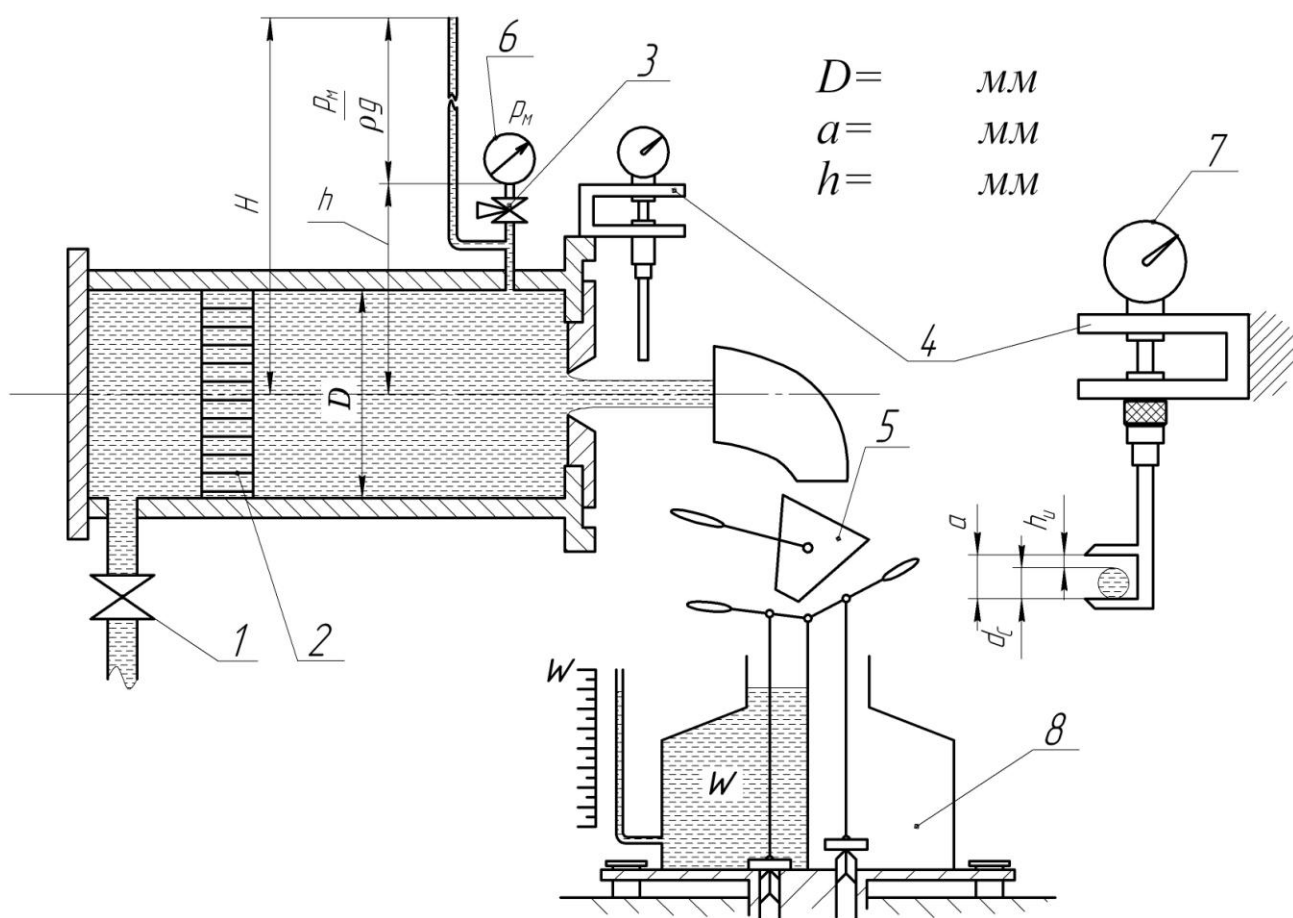


Рис. 1. Общий вид стенда

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.

2.1. Истечение жидкости через отверстие с острой кромкой.

Рассмотрим истечение жидкости через круглое малое отверстие с острой кромкой, выполненное в насадке (рис. 2).

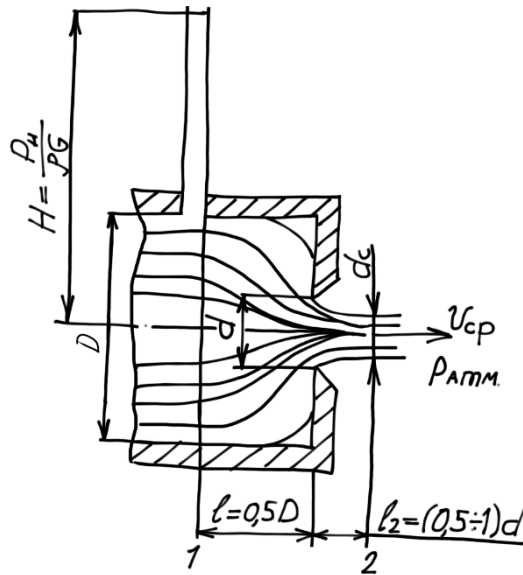


Рис.2. Характер движения жидкости вблизи отверстия

Вдали от отверстия жидкость движется вдоль цилиндра, имея только осевые скорости. При приближении к отверстию движение становится криволинейным, **так как частицы жидкости со всех сторон устремляются к отверстию.**

Появляющиеся при этом **радиальные составляющие скоростей** их движения в силу инерционности жидких частиц **вызывают уменьшение площади поперечного сечения струи, образующейся на выходе из отверстия, по сравнению с площадью самого отверстия.**

Ближайшее к отверстию сечение струи, где скорости движения жидких частиц становятся приближенно параллельными между собой, расположено на расстоянии $l_2 \approx (0,5 \div 1,0)d$ (d – диаметр отверстия).

Это сечение называют сжатым сечением струи, так как площадь этого сечения f_c меньше площади отверстия f . Степень сжатия струи оценивается коэффициентом сжатия

$$\varepsilon = \frac{f_c}{f}. \quad (1)$$

Если отверстие не круглое, а, например, квадратное или треугольное, то наблюдается **явление инверсии струи,** т.е. изменение формы струи по ее длине.

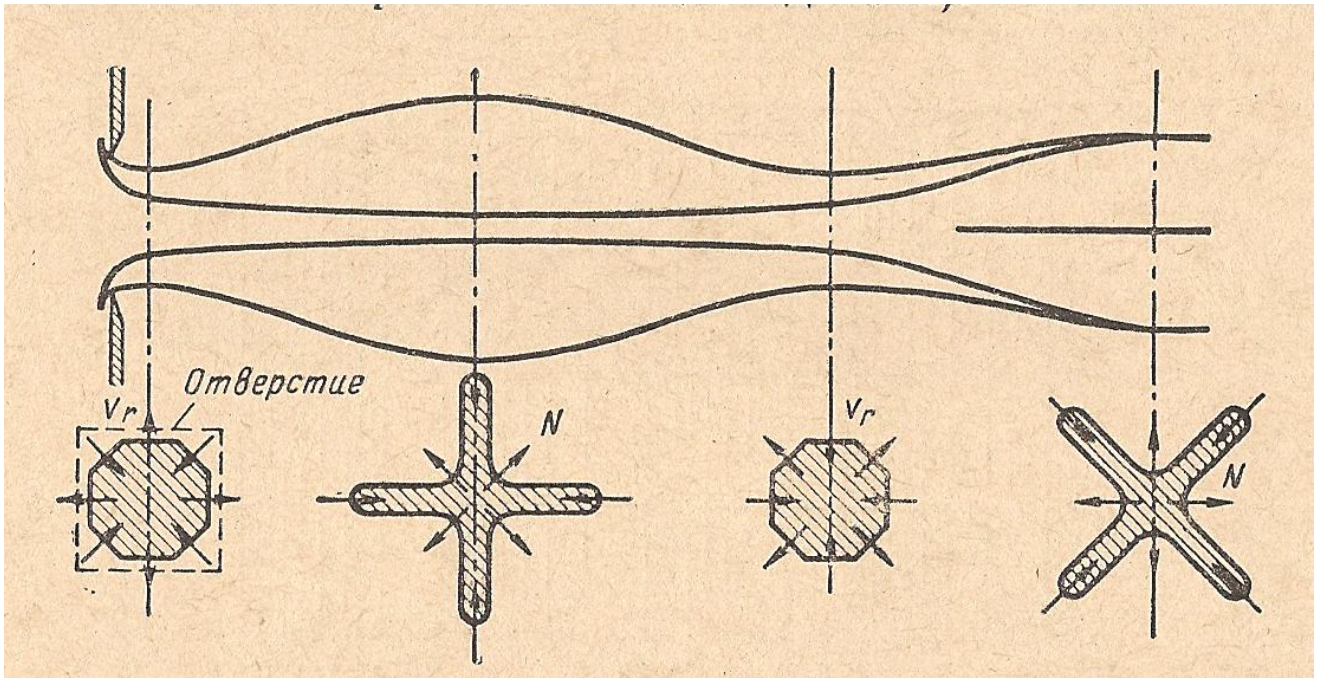


Рис.3. Инверсия струи (истечение жидкости из квадратного отверстия)

Как видно из рисунка, струя, вытекающая из квадратного отверстия, **приобретает на некотором расстоянии крестообразную форму**, что является следствием инерционных свойств жидкости и действия сил поверхностного натяжения.

При решении практических задач скорость движения жидкости в сечения струи оценивают по средней величине, определяемой соотношением:

$$v_{cp} = \frac{Q}{f}, \quad (2)$$

где Q – объемный расход жидкости; f – площадь сечения струи.

Среднюю скорость движения жидкости в сжатом сечении можно вычислить с помощью **уравнения Бернулли**, которое описывает закон сохранения энергии для установившегося потока несжимаемой жидкости в поле силы тяжести. Это уравнение, составленное для сечений 1 и 2 (рис. 2), которые выбраны в резервуаре перед отверстием и на выходе струи (в сжатом сечении), имеет вид

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \zeta \frac{v_2^2}{2g}, \quad (3)$$

где z_1 и z_2 – координаты центров сечений 1 и 2 над горизонтальной плоскостью отсчёта, совпадающей с осевой линией в резервуаре; p_1 и p_2 – абсолютные давления в центрах этих

сечений; v_1 и v_2 – средние скорости в сечениях; α_1 и α_2 – коэффициенты кинетической энергии, зависящие от характера распределения скоростей по сечению; ζ – коэффициент гидравлического сопротивления участка между сечениями 1 и 2.

Трехчлен $z + \frac{p}{\rho g} + \alpha \frac{v^2}{2g}$ характеризует собой энергию, которой обладает поток в этом сечении; **его называют полным напором потока.**

Для выбранных сечений 1 и 2

$$z_1 = z_2; \quad p_2 = p_{атм}; \quad v_1 \ll v_2. \quad (4)$$

Неравенство в выражении (4) следует из условия неразрывности потока несжимаемой жидкости

$$v_1 F_1 = v_2 F_2, \quad (5)$$

где F_1 – площадь сечения цилиндрического резервуара,

F_2 – площадь сечения струи.

$$\text{Обозначим } p_1 - p_{атм} = p_m, \quad v_2 = v_{cp},$$

где v_{cp} – средняя скорость потока в сечении (2).

Учитывая соотношения (4), уравнение (3) запишем в виде

$$\frac{p_m}{\rho g} = \alpha_2 \frac{v_{cp}^2}{2g} + \zeta \frac{v_{cp}^2}{2g}, \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что

$$v_{cp} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 + \zeta}} \sqrt{\frac{2gp_m}{\rho g}}$$

или

$$v_{cp} = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (7)$$

где $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 + \zeta}}$ – безразмерный коэффициент скорости;

$H = h + \frac{P_m}{\rho g}$ – напор истечения.

Расход Q – объем жидкости, проходящий через любое сечение потока в единицу времени:

$$Q = f_c v_{cp} = \varepsilon f \varphi \sqrt{2gH} = \mu f \sqrt{2gH}, \quad (8)$$

где $\mu = \varepsilon \cdot \varphi$ – безразмерный коэффициент расхода.

Коэффициенты ε , φ и μ называют коэффициентами истечения.

Значения коэффициентов истечения зависят от формы отверстия, отношения диаметра отверстия к напору истечения, расстояния между кромкой отверстия и ближайшей к ней стенкой резервуара, а также от особенностей движения жидкости, которые определяются значением числа Рейнольдса Re , Фруда Fr и Вебера We .

Число Re характеризует отношение сил инерции к силам трения. В данном случае число Re определяется по формуле:

$$Re = \frac{d \sqrt{2gH}}{\nu}, \quad (9)$$

где d – диаметр отверстия; ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости.

Зависимость коэффициентов истечения от числа Re для малого круглого отверстия с острой кромкой показана на рис. 4. Из графика видно, что с увеличением числа Re его влияние на коэффициенты истечения уменьшается, становясь бесконечно малым при $Re > 10^5$. В этой зоне (**так называемой квадратичной**) неравномерность скоростей в сжатом сечении струн очень мала.

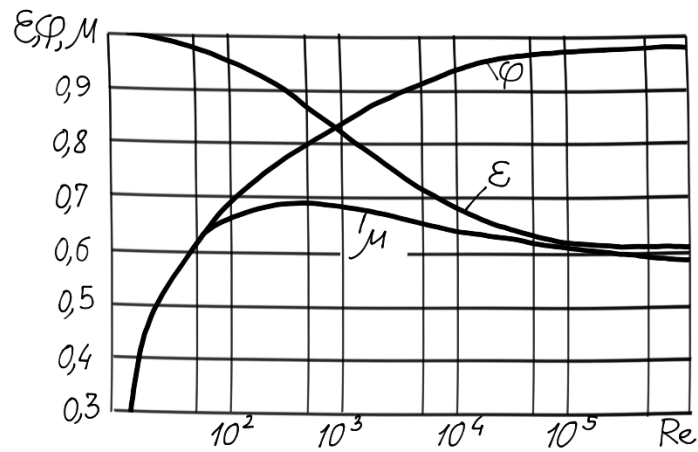


Рис. 4. График зависимости коэффициентов истечения через малое круглое отверстие с острой кромкой от числа Рейнольдса

2.2. Истечение жидкости через цилиндрический насадок.

Параметры струи, вытекающей через отверстие, существенно изменяются, если присоединять к нему короткие трубки (насадки).

Рассмотрим истечение жидкости из внешнего цилиндрического насадка, представляющего собой короткую цилиндрическую трубку длиной $l = (3 \div 4)d$, присоединенную к отверстию в стенке сосуда (рис. 5).

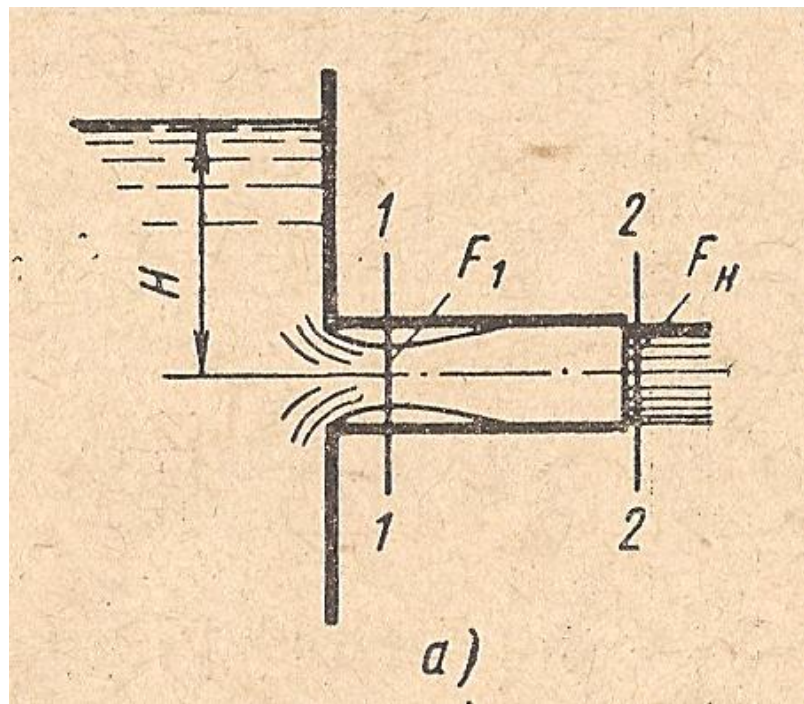


Рис. 5. Характер движения жидкости в цилиндрическом насадке

Механизм действия сил, формирующих поток жидкости на входе в насадок и в непосредственной близости за его входным сечением, идентичен механизму истечения через отверстия в тонкой стенке. Следовательно, **в случае присоединения внешнего цилиндрического насадка практически не изменяется форма струи на участке до сжатого сечения.**

За сжатым сечением струя может иметь различную форму:

1. *Она может пройти через насадок, не касаясь его стенок.*

В этом случае струя не отличается от струи, образующейся при истечении через отверстие; насадок не оказывает влияние на параметры струи.

2. *Если струя коснется поверхности насадка,* то вследствие торможения пристеночных слоев расширится, и на выходе в атмосферу ее сечение станет равным сечению насадка.

Первый режим истечения принято называть **отрывным**, а второй – **безотрывным**.

При безотрывном режиме течения вокруг транзитного потока от точки схода с острой кромки входного сечения и до точки касания стенки насадка после сжатого сечения потока образуется кольцевая замкнутая полость, ограниченная с одной стороны самим транзитным потоком, а с другой – стенками насадка (рис. 5).

По мере увеличения напора на входе в насадок увеличивается и скорость истечения. При этом размеры замкнутой полости в продольном направлении также увеличиваются.

При определенном напоре (критическом или срывном напоре) продольные размеры полости станут равными длине насадка. Дальнейшее повышение напора на входе в насадок приведет к отрыву потока от стенок насадка. Режим истечения станет аналогичным режиму истечения через отверстие с острой кромкой.

Формирование и развитие безотрывного и возникновение отрывного течений можно наблюдать при испытаниях осесимметричной (цилиндрической) и плоской (подводящий канал и сам насадок выполнены в виде достаточно узких прямоугольных щелей) прозрачных моделей насадков.

При истечении жидкости из больших резервуаров через цилиндрический насадок скорость струи на выходе из насадка и расход определяют по общим формулам (7) и (8). Но при этом следует учитывать, что если истечение жидкости из насадка происходит в безотрывном режиме, то сжатие струи на выходе из насадка отсутствует и, следовательно, $\varepsilon = 1$.

2.2. Истечение жидкости через коноидальный насадок.

При истечении жидкости через отверстие с острой кромкой расход жидкости определяется коэффициентом расхода $\mu = \varepsilon \cdot \varphi$. Из графиков, приведенных на рис. 4, следует, что при числах $Re > 10^5$ определяющим во влиянии на расход становится коэффициент сжатия струи.

Следовательно, для увеличения расхода при тех же значениях напора на входе в насадок и площади выходного отверстия необходимо исключить источник возникновения сжатия струи.

Такому требованию отвечает так называемый коноидальный насадок (рис. 6).

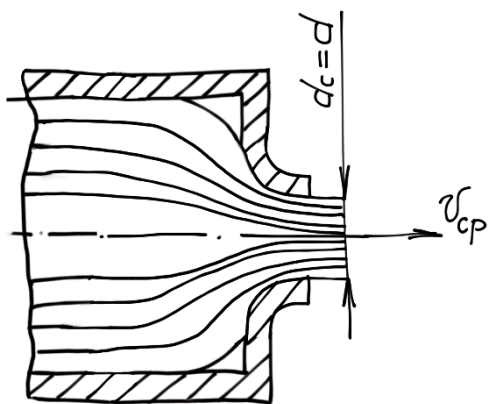


Рис.6. Характер движения жидкости в коноидальном насадке

Форма его внутренней поверхности повторяет конфигурацию струи при ее истечении из отверстия с острой кромкой, исключая таким образом сжатие струи на выходе из насадка. Коноидальный насадок обеспечивает коэффициент сжатия струи на выходе из насадка с $\varepsilon = 1$.

Однако, следует иметь в виду, что, поскольку в насадке поток жидкости движется вдоль его стенок безотрывно, возникают потери напора на трение. Это приводит к увеличению по сравнению с истечением через отверстие с острой кромкой коэффициента потерь ζ и соответственно к некоторому уменьшению коэффициента скорости φ .

При истечении жидкости из больших резервуаров через коноидальный насадок скорость струи на выходе и расход определяют по общим формулам (7) и (8).

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

3.1. Описание экспериментального стенда.

Установка для определения коэффициентов истечения жидкости через отверстия и насадки (рис. 1) представляет собой цилиндрический горизонтальный резервуар (диаметр

$D = 250\text{мм}$), в центре торцевой стенки которого подсоединяются различные насадки.

Подача рабочей жидкости (вода, $v = 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$) осуществляется через трубу, в которой установлен запорный вентиль 1. Пакет трубок 2 предназначен для выравнивания значений и направлений скоростей потока перед отверстием.

Вытекающая из резервуара струя направляется козырьком в перекидное устройство 5,. Этим устройством вода может направляться либо на слив, либо в отсек мерного бака 8, предназначенный для измерения расхода. Мерный бак – резервуар, разделенный перегородкой на два отсека, каждый из которых имеет отверстие для слива воды. Сливные отверстия закрыты клапанами, имеющими ручное управление, к каждому отсеку присоединено водомерное стекло, представляющее собой открытую в атмосферу стеклянную трубку, по высоте уровня воды в которой с помощью шкалы, градуированной в объемных единицах, измеряют объем воды в мерном отсеке.

Для измерения напора H истечения при испытаниях отверстия с острой кромкой и насадков, к резервуару подключают пружинный манометр 6, расположенный на расстоянии $h = 230\text{мм}$ и пьезометр. На трубке, соединяющей манометр с резервуаром, установлен трехходовой кран 3, с помощью которого можно отключать прибор от резервуара и соединять последний с атмосферой для полного заполнения резервуара жидкостью.

Для измерения диаметра d_c струи установка оснащена **микрометрическим устройством** 7 (рис. 7), в котором диаметр струи определяется как разность расстояния $a = 13\text{мм}$ между губками прямоугольной вилки и перемещения индикатора h_u , необходимого для касания поверхности струи поочередно одной и другой губками этой вилки.

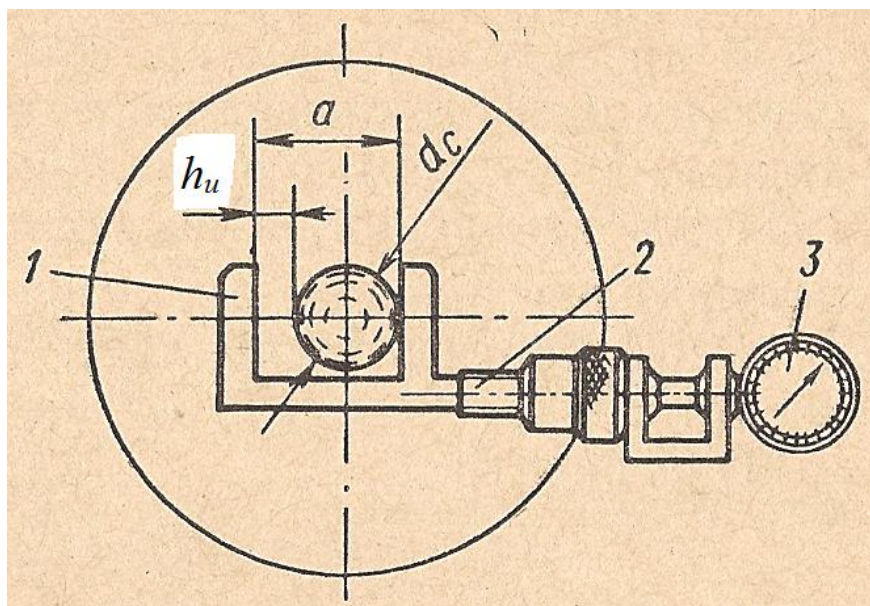


Рис.7. Микрометрическое устройство для измерения диаметра струи

Время T заполнения водой мерного бака измеряют секундомером.

3.2. Порядок выполнения работы.

1. Определение коэффициентов истечения через малое круглое отверстие с острой кромкой. На передней торцовой стенке цилиндрического резервуара устанавливают диск с отверстием. Резервуар заполняют до полного вытеснения воздуха из него, для чего открывают вентиль 1 (рис. 1), а трехходовой кран 3 устанавливают в положение, при котором манометр отключается и резервуар сообщается с атмосферой. После окончания проливки, когда через кран 3 перестанет выходить воздух, этот кран переводят в положение, при котором манометр сообщается с резервуаром.

С помощью вентиля 1 в резервуаре устанавливает требуемое давление.

Мерный бак подготавливают к измерению. С этой целью один из отсеков бака опорожняют и его сливное отверстие закрывают клапаном. Клапан другого отсека при этом открыт: через него вода сливается из установки. Затем измеряют время заполнения водой (до уровня находящегося в пределах горловины) отсека мерного бака. Для этого включают секундомер и одновременно перекидным устройством воду направляют в отсек; по заполнении бака выключают секундомер и воду направляют на слив. В протокол записывают показания секундомера t_c (в минутах и секундах) и объема W_B (в литрах) по шкале водомерного бака.

При заполнении отсека, т.е. во время опыта, необходимо следить за тем, чтобы напор H истечения оставался постоянным. Это обуславливает постоянство расхода Q во время опыта и возможность определения истинного расхода по показаниям на шкале мерного бака и секундомера. При небольших колебаниях давления в протокол записывают среднее за время опыта показание манометра P_m (в делениях).

Во время опыта измеряют диаметр струи. Для этого верхнюю губку микрометрического устройства 7 подводят к поверхности струи, ноль шкалы индикатора совмещают с его стрелкой; затем прибор с помощью микрометрического винта переводят в положение, при котором нижняя губка будет подведена к поверхности струи. Полученное при этом показание индикатора h_u записывают в протокол.

В данной последовательности измерения повторяют для всего ряда намеченных для эксперимента показаний манометра или пьезометра.

2. Исследование параметров потока при истечении жидкости из цилиндрического насадка. В передней торцовой стенке цилиндрического резервуара устанавливают цилиндрический насадок.

Порядок выполнения эксперимента аналогичен изложенному в п. 1, за исключением измерения коэффициента сжатия струи ε , так как сжатие струи при такой форме насадка отсутствует.

При плавном увеличении давления на входе в насадок наблюдают смену истечения через цилиндрический насадок на истечение через отверстие. Напор, при котором происходит такое скачкообразное изменение режима истечения, называется **критическим (срывным) напором насадка** $H_{кр}$, при котором безотрывной режим истечения перейдет в отрывной.

3. Определение коэффициентов истечения через коноидальный насадок. В передней торцевой стенке цилиндрического резервуара устанавливают коноидальный насадок.

Порядок выполнения эксперимента аналогичен изложенному в п. 1, за исключением измерения коэффициента сжатия струи ε , так как сжатие струи при такой форме насадка отсутствует.

3.3. Обработка и анализ экспериментальных данных.

В протокол записывают результаты испытаний и результаты расчётов. На основании полученных данных вычисляют следующие параметры.

$$1. \text{ Расход струи, } \frac{m^3}{c} \qquad Q_c = \frac{W}{T},$$

$$2. \text{ Напор истечения, } m \qquad H = h + \frac{P_m}{\rho g},$$

где P_m – избыточное давление в резервуаре перед отверстием.

3. Диаметр струи (только при истечении жидкости через отверстие с острой кромкой)

$$d_c = a - h_u,$$

где a – расстояние между губками прибора для измерения диаметра;

h_u - показание индикатора.

4. Коэффициенты истечения

$$\varepsilon = \left(\frac{d_c}{d}\right)^2; \quad \mu = \frac{Q_c}{f \sqrt{2gH}}; \quad \varphi = \frac{\mu}{\varepsilon};$$

5. Число Рейнольдса

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

где ν – кинематический коэффициент вязкости воды, определяемый в зависимости от ее температуры ($\theta^{\circ}\text{C}$) по графику $\nu = f(\theta)$ приведённому на рис. 8.

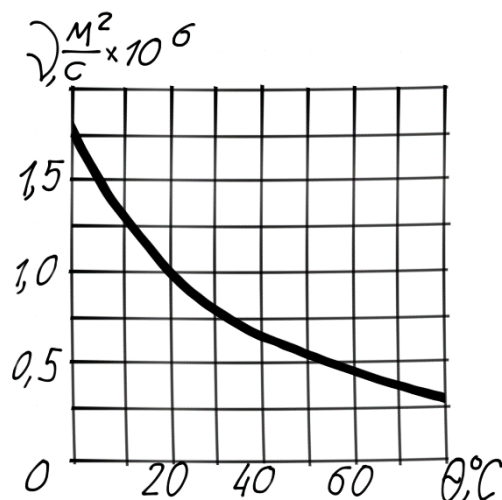


Рис.8. График зависимости кинематического коэффициента вязкости воды от температуры

Значения коэффициентов истечения, полученные для отверстия, сравнивают со значениями, приведенными на рис. 4. Значения одноименных коэффициентов, полученные для отверстия и насадков, сравнивают между собой и анализируют причины их различия.

Сравнивают между собой значения напоров, при которых происходит переход от безотрывного истечения к отрывному и отрывного к безотрывному. Анализируют причины их различия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башта Т.М., Руднев С.С. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для вузов / 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во «Альянс», 2010. 423 с., с ил.
2. Сборник задач по гидравлике для технических вузов: учеб. пособие / Д.А. Бутаев, З.А. Калмыкова, Л.Г. Подвидз, К.Н. Попов, С.Н. Рождественский, Б.И. Яньшин; под ред. И.И.Куколевского, Л.Г.Подвидза. 6-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 486 с.
3. Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередат: Учебное пособие для машиностроительных вузов / Под ред. С.С.Руднева, Л.Г.Подвидза. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1974. 416 с., с ил.