

Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

---

**В.С. Кузнецов, А.С. Шабловский, В.В. Яроц**

**Экспериментальное определение  
коэффициентов истечения жидкости  
через отверстия и насадки**

*Методические указания  
к выполнению лабораторной работы  
по дисциплине «Механика жидкости и газа»*



Москва

**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  
МГТУ им. Н. Э. Баумана

**2016**

УДК 532.5  
ББК 30.123  
К89

Издание доступно в электронном виде на портале *ebooks.bmstu.ru*  
по адресу: <http://ebooks.bmstu.ru/catalog/105/book1375.html>

Факультет «Энергомашиностроение»  
Кафедра «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика»

Рекомендовано Редакционно-издательским советом  
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве методических указаний

Рецензент  
канд. техн. наук, доцент С.Н. Прудников

**Кузнецов, В. С.**  
К89 Экспериментальное определение коэффициентов истечения жидкости через отверстия и насадки : методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Механика жидкости и газа» / В.С. Кузнецов, А.С. Шабловский, В.В. Яроц. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — 21, [3] с., ил.

ISBN 978-5-7038-4155-6

Изложены основные сведения об истечении жидкости через отверстия и насадки. Рассмотрена методика экспериментального определения коэффициентов истечения жидкости через отверстия и насадки. Приведены описания экспериментальных стендов, порядок проведения опытов и обработки результатов измерений.

Для студентов, обучающихся по программам бакалавриата и специалитета и изучающих дисциплину «Механика жидкости и газа».

УДК 532.5  
ББК 30.123

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016  
© Оформление. Издательство  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

ISBN 978-5-7038-4155-6

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Задачи об истечении жидкости через отверстия в тонких стенках или через короткие трубки специальной формы (насадки) часто встречаются в инженерной практике. Такие задачи возникают при определении времени опорожнения емкостей в топливозаправочных системах, в расчетах форсунок в топливных системах двигателей, при проектировании средств пожаротушения и т. п. В общем случае возникающие при этом струи жидкости используются в качестве носителей вещества или механической энергии. Решением задачи об истечении является установление зависимости между напором истечения и скоростью (или расходом) струи, вытекающей из отверстия или насадка.

При выполнении лабораторной работы студенты должны изучить в демонстрационном режиме некоторые гидродинамические характеристики процесса истечения жидкости из отверстий разной геометрической формы и насадков, экспериментально определить коэффициенты истечения жидкости через малое круглое отверстие с острой кромкой, внешний цилиндрический и конoidalный насадки; исследовать характер течения жидкости в цилиндрическом насадке при отрывном и безотрывном режимах истечения. В приложении приведен образец бланка отчета о лабораторной работе.

**Цель работы** — ознакомление на основе физического эксперимента с некоторыми практически важными гидродинамическими характеристиками процесса истечения жидкости через отверстия и насадки, изучение методики их количественного измерения.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Истечение жидкости через малое круглое отверстие с острой кромкой

Рассмотрим истечение жидкости через малое круглое отверстие с острой кромкой, выполненное в центре торцевой стенки цилиндрического резервуара (далее — резервуар) с  $D \gg d$  (рис. 1).

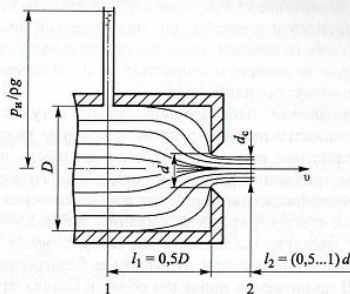


Рис. 1. Истечение жидкости через малое круглое отверстие с острой кромкой:

$v$  — скорость струи;  $d_c$  — диаметр струи;  $\frac{p_w}{\rho g}$  — располагаемый напор;

$p_a$  — избыточное давление;  $\rho$  — плотность жидкости;  $l_1$  — длина формирования потока;  $l_2$  — расстояние до отверстия;

$D$  — внутренний диаметр резервуара;  $d$  — диаметр отверстия

Внутри резервуара вдали от отверстия частицы жидкости движутся, имея только осевые составляющие 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 нормального сечения струи, образующейся на выходе из отверстия, по сравнению с площадью самого отверстия.

Ближайшее к отверстию нормальное сечение струи, где линии тока жидких частиц становятся приблизительно параллельными осевой линии струи, расположено на расстоянии

$$l_2 \approx (0,5 \dots 1)d,$$

где  $d$  — диаметр отверстия.

Нормальное сечение струи имеет практически круглую форму, его называют сжатым сечением струи, так как площадь этого сечения  $F_c$  меньше площади отверстия  $F_0$ . Степень сжатия струи оценивают коэффициентом сжатия

$$\varepsilon = \frac{F_c}{F_0} = \left( \frac{d_c}{d_0} \right)^2 < 1. \quad (1)$$

Если отверстие не круглое, а, например, квадратное или треугольное, то наблюдается явление инверсии струи, т. е. изменение формы струи по ее длине (рис. 2). Струя, вытекающая из квадратного отверстия, приобретает на некотором расстоянии крестообразную форму, что является следствием инерционных свойств жидкости и действия сил поверхностного натяжения.

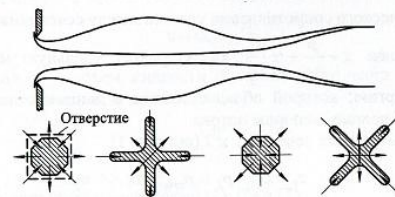


Рис. 2. Инверсия струи (истечение жидкости из квадратного отверстия)

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

$$v = \frac{Q}{F_c}, \quad (2)$$

где  $Q$  — объемный расход жидкости;  $F_c$  — площадь нормального сечения струи.

Среднюю скорость движения жидкости в сжатом сечении можно вычислить с помощью уравнения Бернулли, которое является уравнением баланса удельной механической энергии с учетом ее потерь для установившегося потока несжимаемой жидкости в поле силы тяжести. Это уравнение, составленное для сечений 1 и 2 (см. рис. 1), 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 отсчета, 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 1 и 2;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты кинетической энергии, зависящие от характера распределения действительных скоростей по сечению;  $\zeta$  — коэффициент гидравлического сопротивления участка между сечениями 1 и 2.

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

Для выбранных сечений 1 и 2 (см. рис. 1)

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

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 резервуара;  $F_2$  — площадь сечения струи.

Обозначим

$$p_1 - p_{\text{атм}} = p_n; \quad v_2 = v,$$

где  $v$  — средняя скорость потока в сечении 2 (см. рис. 1).

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

$$\frac{p_n}{\rho g} = \alpha_2 \frac{v^2}{2g} + \zeta \frac{v^2}{2g}. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что

$$v = \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 + \zeta}} \sqrt{\frac{2gp_n}{\rho g}}.$$

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

$\frac{p_n}{\rho g} = H$  — располагаемый напор истечения.

Тогда

$$v = \varphi \sqrt{2gH}. \quad (7)$$

Расход  $Q$  — объем жидкости  $W$ , проходящей через любое сечение потока в единицу времени  $t$ :

$$Q = \frac{W}{t},$$

или в соответствии с формулами (1), (2) и (7):

$$Q = F_2 v = \varepsilon F_0 \varphi \sqrt{2gH} = \mu F_0 \sqrt{2gH}, \quad (8)$$

где  $\mu = \varepsilon \varphi$  — безразмерный коэффициент расхода.

Из формулы (8) следует

$$\mu = \frac{Q}{F_0 \sqrt{2gH}} < 1.$$

Коэффициенты  $\varepsilon$ ,  $\varphi$  и  $\mu$  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 чисел Рейнольдса  $Re$ , Фруда  $Fg$  и Вебера  $We$ .

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

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

где  $d$  — диаметр отверстия;  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости.

Число  $Fg$  характеризует отношение сил инерции, действующих в потоке, к силам тяжести. Для струи, истекающей из круглого отверстия, число  $Fg$  находят по формуле

$$Fg = \frac{H}{d}. \quad (10)$$

Число  $We$  характеризует отношение сил инерции к силам поверхностного натяжения жидкости. Для струи, истекающей из круглого отверстия,

$$We = \frac{\rho g H d}{\sigma}, \quad (11)$$

где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Для воды, граничащей с воздухом при  $t = 20^\circ \text{C}$ ,

$$\sigma = 73 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}.$$

При  $Fg < 100$  и  $We > 100$  влияние сил тяжести и сил поверхностного натяжения жидкости на процесс истечения практически отсутствует. В этом случае для отверстия коэффициенты истечения зависят только от критерия вязкостного подобия — числа  $Re$ .

Зависимость коэффициентов истечения от числа  $Re$  для малого круглого отверстия с острой кромкой приведена в научной литературе. Из графика, приведенного на рис. 3, видно, что с увеличением числа  $Re$  его влияние на коэффициенты истечения изменяется, становясь исчезающе малым при  $Re > 10^5$  (в так называемой квадратичной зоне).

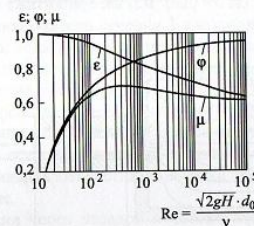


Рис. 3. График зависимости коэффициентов истечения через малое круглое отверстие с острой кромкой от числа Рейнольдса

### Истечение жидкости через насадки

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

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

Механизм действия сил, формирующих поток жидкости на входе в насадок и в непосредственной близости за его входным отверстием, идентичен механизму истечения через малое круглое отверстие. 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. Она может пройти через насадок, не касаясь его стенок (см. пунктирную линию на рис. 4). В этом случае струя не отличается от струи,

образующейся при истечении через отверстие, насадок не оказывает влияния на параметры струи. Если струя коснется внутренней поверхности насадка, то вследствие торможения пристеночных слоев она расширится и на выходе в атмосферу ее сечение станет равным сечению насадка (см. сплошную линию на рис. 4). Первый режим истечения принято называть отрывным, а второй – безотрывным.

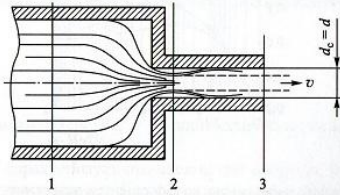


Рис. 4. Истечение жидкости через внешний цилиндрический насадок:  $d$  — внутренний диаметр насадка;  $d_c$  — диаметр струи;  $v$  — скорость струи

При достижении определенного напора истечения (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. Эта полость ограничена с одной стороны самим транзитным потоком, а с другой — стенками насадка (см. рис. 4). Полость заполнена паровоздушными пузырьками, выделяющимися из транзитного потока.

По мере увеличения напора на входе в насадок увеличивается и скорость истечения. При этом размеры кольцевой замкнутой полости в продольном направлении также увеличиваются. При дальнейшем увеличении напора продольные размеры этой полости станут равными длине насадка, что в конечном счете приведет к отрыву потока от стенок насадка. Картина истечения станет аналогичной истечению через отверстие с острой кромкой.

Формирование и развитие безотрывного и возникновение отрывного течений можно наблюдать при демонстрации течения

жидкости через прозрачные модели осесимметричного (цилиндрического) и плоского (подводящий канал и сам насадок выполнены в виде достаточно узких прямоугольных щелей) насадков.

При истечении жидкости через насадок с образованием замкнутой полости расход будет определяться значением перепада давлений между сечением 1 на входе в насадок и сечением 2 в месте наибольшего сжатия потока (см. рис. 4). Из уравнения Бернулли (3) для наиболее сжатого сечения 2 и выходного сечения насадка 3 следует, что, если истечение происходит в атмосферу, давление в замкнутой полости должно быть ниже атмосферного. Следовательно, истечение жидкости в этом случае будет происходить при большем перепаде давлений, чем при истечении через отверстие с острой кромкой. Поскольку сжатие струи внутри насадка и за отверстием с острой кромкой практически одинаково, то при одинаковых площадях отверстия и насадка расход через последний будет больше.

При истечении через насадок в потоке появляются дополнительные потери напора, которых нет в струе, вытекающей через отверстие с острой кромкой. Эти потери возникают при расширении потока внутри насадка и за счет трения о стенки насадка (см. участок между сечениями 2 и 3 на рис. 4). Однако, как показывают расчеты и эксперимент, при длине насадка  $l = (3 \dots 4) d$  эти потери намного меньше, чем повышение напора истечения в результате возникновения в потоке вакуума. Поэтому данный насадок в зоне безотрывных режимов истечения увеличивает расход, но снижает среднюю скорость движения жидкости в струе на выходе из насадка.

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,  $\epsilon = 1$ .

**Конoidalный насадок.** При истечении жидкости через отверстие с острой кромкой расход жидкости определяется коэффициентом расхода  $\mu = \epsilon \phi$ . На графиках, приведенных на рис. 3, видно, 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 конoidalный насадок (рис. 5).

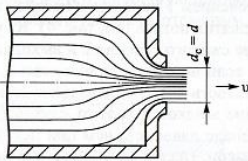


Рис. 5. Истечение жидкости через конoidalный насадок:  $d$  — внутренний диаметр насадка;  $d_c$  — диаметр струи;  $v$  — скорость струи

Форма его внутренней поверхности повторяет конфигурацию струи при ее свободном истечении из отверстия с острой кромкой, исключая таким образом сжатие струи на выходе из насадка. Конoidalный насадок обеспечивает коэффициент сжатия струи на выходе из насадка с  $\epsilon = 1$ . 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 гидравлического сопротивления  $\zeta$  и соответственно к уменьшению коэффициента скорости  $\phi$ .

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Описание экспериментальной установки

Установка для определения коэффициентов истечения жидкости через отверстия и насадки (рис. 6) представляет собой цилиндрический горизонтальный резервуар 1 (внутренний диаметр  $D = 250$  мм), в центре торцевой стенки которого выполнено круглое отверстие с острой кромкой (диаметр  $d$ ) или насадок. Подача

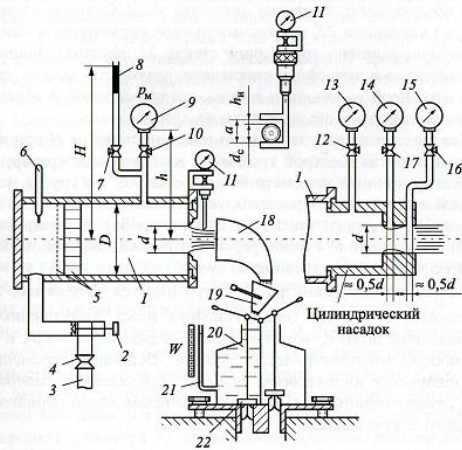


Рис. 6. Схема экспериментальной установки: 1 — резервуар; 2 — регулирующий вентиль; 3 — труба; 4 — запорный вентиль; 5 — сетка и пакет трубок; 6 — термометр; 7 — кран; 8 — пьезометр; 9 — манометр; 10 — трехходовой кран; 11 — индикатор для измерения диаметра струи; 12 — трехходовой вентиль; 13 — манометр; 14, 15 — вакуумметры; 16, 17 — запорные краны; 18 — козырек; 19 — перекидное устройство; 20 — мерный бак; 21 — водомерное стекло; 22 — клапаны сливных отверстий

рабочей жидкости осуществляется через трубу 3, на которой установлен запорный 4 и регулирующий 2 вентили. Сетка и пакет трубок 5 предназначены для создания такой картины течения в резервуаре, когда линии тока элементарных частиц жидкости параллельны осевой линии резервуара.

Вытекающая из резервуара струя направляется козырьком 18 в перекидное устройство 19, представляющее собой качающийся патрубок. Этим устройством вода может направляться либо на слив через правый отсек мерного бака 20, либо в левый (мерный) отсек этого бака, предназначенный для измерения объема. Каждый отсек объема имеет отверстие для слива воды. Сливные отверстия закрыты клапанами 22, имеющими ручное управление, к каждому отсеку присоединено водомерное стекло 21, представляющее собой открытую в атмосферу стеклянную трубку, по высоте уровня воды в которой с помощью шкалы, градуированной в объемных единицах, измеряют объем  $W$  воды в мерном отсеке.

Для измерения располагаемого напора истечения  $H$  при испытаниях отверстия с острой кромкой и насадков к резервуару подключен пружинный манометр 9 и пьезометр 8. На трубке, соединяющей манометр с резервуаром, установлен трехходовой кран 10, с помощью которого можно отключать прибор от резервуара и соединять последний с атмосферой. На трубке, соединяющей пьезометр с резервуаром, установлен кран 7.

Для измерения диаметра  $d_c$  струи имеется устройство, представляющее собой два горизонтальных ножа, закрепленных на вертикальной штанге, которую можно перемещать вверх и вниз с помощью микрометрического винта. Величина перемещений контролируется индикатором 11. Для определения температуры воды служит термометр 6. Время  $t$  заполнения водой мерного бака измеряют секундомером.

### Порядок выполнения работы

1. *Определение коэффициентов истечения через малое круглое отверстие с острой кромкой.*

На передней торцовой стенке цилиндрического резервуара устанавливают диск с малым круглым отверстием с острой кромкой. Резервуар 1 заполняют до полного вытеснения воздуха из не-

го, для чего открывают вентили 2 и 4 (см. рис. 6), а трехходовой кран 10 устанавливают в положение, при котором манометр отключается и резервуар сообщается с атмосферой. По окончании проливки, когда через кран 10 перестанет выходить воздух, этот кран переводят в положение, при котором манометр сообщается с резервуаром 1.

Регулирующим вентилем 2 в резервуаре 1 устанавливают требуемое давление. Если это давление меньше 20 кПа, вместо манометра включают пьезометр 8 (открывают кран 7).

Мерный бак 20 готовят к измерению, для чего левый отсек бака опорожняют и его сливное отверстие закрывают клапаном 22. Клапан правого отсека бака при этом открыт: через него вода сливается из установки. Затем измеряют время заполнения мерного отсека бака жидкостью определенного объема. Для этого включают секундомер и одновременно перекидным устройством 19 воду направляют в левый отсек. По заполнении бака выключают секундомер и воду направляют на слив. В протокол испытаний записывают показания секундомера  $t$  и объема  $W$  по водомерной шкале бака. При заполнении левого 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 испытаний записывают среднее за время опыта показание манометра ( $p_m$ ) или пьезометра ( $H$ ).

Во время опыта измеряют диаметр  $d_c$  струи, для чего верхний нож устройства для определения диаметра струи подводят к поверхности струи, нуль шкалы индикатора совмещают с его стрелкой; затем это устройство переводят в положение, при котором нижний нож подведен к поверхности струи. Полученное при этом показание индикатора  $h_n$  записывают в протокол испытаний.

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

2. *Определение коэффициентов истечения через внешний цилиндрический и конoidalный насадок.*

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

### 3. Демонстрация течения жидкости в прозрачном цилиндрическом насадке.

После выполнения всех необходимых измерений при работе с малым круглым отверстием, внешним цилиндрическим насадком и конoidalным насадком визуально наблюдают на демонстрационной модели картину течения жидкости в прозрачном цилиндрическом насадке (см. рис. 6), который также устанавливается в торце цилиндрического резервуара 1. Напор истечения  $H$  можно определить по показаниям манометра 13, так как подводящий канал для этого насадка меньше внутреннего диаметра  $D$  резервуара. На его присоединительной трубке установлен трехходовой вентиль 12, имеющий то же назначение, что и кран 10. Вакуум на внутренней поверхности насадка можно оценить по показаниям вакуумметров 14 и 15. На присоединительных трубках этих вакуумметров установлены запорные краны 17 и 16, позволяющие их отключать в процессе переналадки стенда.

Визуальное наблюдение картины течения следует начинать с малых значений давлений на входе в резервуар, контролируемых по манометру 13, при которых в насадке возникает безотрывный режим истечения. Количество контролируемых параметров следует увеличить при приближении хвостовой части потока к точке измерения давления вакуумметром 15. При этом в целях предотвращения преждевременного срыва потока перед каждой установкой нового значения давления на входе в насадок следует закрывать вентили 17 и 16, а затем плавно их открывать.

При плавном увеличении давления на входе в насадок можно определить критическое значение напора  $H_{кр}$ , при котором безотрывный режим истечения перейдет в отрывной.

### Обработка и анализ экспериментальных данных

Перед выполнением эксперимента в протокол испытаний (форма отчета о лабораторной работе дана в приложении) записывают заранее известные параметры:

- $D$  — внутренний диаметр резервуара 1;
- $a$  — расстояние между ножами устройства с индикатором 11;

- $h$  — поправка на положение манометра 9;
- $d$  — диаметр отверстия и насадков двух типов.

Кроме того, в протоколе указывают пределы измерения и цены деления манометра 9 и индикатора 11.

При проведении эксперимента в протокол испытаний записывают показания приборов и результаты расчетов. На основании полученных данных вычисляют параметры, указанные ниже.

1. *Расход ( $m^3/c$ )*

$$Q = \frac{W}{t} = \frac{W_k - W_n}{t_k - t_n},$$

где индексы «к» и «н» соответствуют концу и началу опыта.

2. *Напор истечения (м)*

$$H = \frac{p_n}{\rho g},$$

где  $p_n$  — избыточное давление в резервуаре перед отверстием.

Для определения значения  $p_n$  снимают показания  $p_m$  (Па) манометра 9. Затем вычисляют избыточное давление по формуле

$$p_n = p_m + \rho gh,$$

где  $h$  — поправка на положение манометра.

Тогда напор истечения

$$H = \frac{p_n}{\rho g} = \frac{p_m}{\rho g} + h.$$

При использовании пьезометра напор истечения равен показанию пьезометра.

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

$$d_c = a - h_n,$$

где  $a$  — расстояние между ножами устройства для измерения диаметра струи;  $h_n$  — показание индикатора 11 (см. рис. 6).

#### 4. Коэффициенты истечения

$$\varepsilon = \left(\frac{d_c}{d}\right)^2; \quad \mu = \frac{Q}{F_0 \sqrt{2gH}}; \quad \varphi = \frac{\mu}{\varepsilon}$$

#### 5. Число Рейнольдса

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

где  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости, определяемая в зависимости от ее температуры  $\theta, ^\circ\text{C}$ , по графику  $\nu = f(\theta)$ , приведенному на рис. 7.

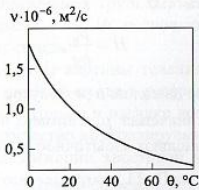


Рис. 7. График зависимости кинематической вязкости  $\nu$  воды от ее температуры  $\theta$

Измеренные и рассчитанные значения записывают в протокол испытаний.

Значения коэффициентов истечения, вычисленные для отверстия, сравнивают с известными из учебной литературы коэффициентами, приведенными на рис. 3. Значения одноименных коэффициентов, рассчитанные для отверстия и насадков, сравнивают и анализируют причины их различия.

При демонстрации истечения жидкости через цилиндрический насадок сравнивают между собой значения напоров, при которых происходит переход от безотрывного истечения к отрывному, и наоборот. Анализируют причины их различия.

#### ЛИТЕРАТУРА

Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для вузов / Т.М. Башта и др. М.: Альянс, 2010. 423 с.

Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередач: учебное пособие для машиностроительных вузов / под ред. С.С. Руднева, Л.Г. Подвидза. М.: Машиностроение, 1974. 416 с.

Сборник задач по машиностроительной гидравлике: учебное пособие для машиностроительных вузов / Д.А. Бугаев, З.А. Калмыкова, Л.Г. Подвидз и др.; под ред. И.И. Куколевского, Л.Г. Подвидза. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 448 с.

Шабловский А.С. Выполнение домашних заданий и курсовых работ по дисциплине «Механика жидкости и газа»: учебное пособие: в 2 ч. Ч. 2: Гидродинамика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 65 с.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Какие величины определялись в данной лабораторной работе?
3. Какое давление можно определить по показанию манометра  $P$ ?
4. Какова методика экспериментального определения расхода?
5. В каких единицах измеряется расход жидкости?
6. В чем заключается физический смысл коэффициентов  $\mu, \varphi, \varepsilon$ ?
7. В каком месте измеряется скорость сжатой струи при истечении жидкости через малое круглое отверстие с острой кромкой?
8. Что обозначает выражение  $\sqrt{2gH}$ ?
9. Какая вязкость входит в формулу для определения числа Рейнольдса? Какая связь существует между динамической и кинематической вязкостью?
10. В каких единицах измеряется динамическая и кинематическая вязкость в системе СИ?
11. Какие области на графике  $\mu, \varphi, \varepsilon = f(Re)$  (см. рис. 3) можно выделить?
12. Каковы возможные режимы работы цилиндрического насадка?

#### ПРИЛОЖЕНИЕ

##### Форма отчета о лабораторной работе

МГТУ им. Н.Э. Баумана Кафедра 3-10 Лаборатория им. И.И. Куколевского	Отчет по лабораторной работе №1 «Экспериментальное определение коэффициентов истечения»	Группа _____ Студент _____
---	---	-------------------------------

$D = \quad \text{мм}$   
 $a = \quad \text{мм}$   
 $h = \quad \text{мм}$

$Q = \mu \cdot f \cdot \sqrt{2gH} \quad V_s = \varphi \cdot \sqrt{2gH} \quad f_s = \varepsilon \cdot f \quad \mu = \varphi \cdot \varepsilon \quad Re = \frac{d \sqrt{2gH}}{\nu}$

СХЕМА УСТАНОВКИ

1. Вентиль для регулирования расхода.
2. Резервуар с усилителем.
3. Краев перепадной.
4. Прибор для измерения диаметра струи.
5. Перепадное устройство.

№ п/п	Наименование прибора	Пределы измерения	Цена деления шкалы
6.	Манометр		
7.	Индикатор перемещения		
8.	Мерный бак Секундомер		

Для воды

$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$

$\theta, ^\circ\text{C}$

Для круглого малого отверстия  
с острой кромкой

$\varepsilon, \varphi, \mu$

$Re$

$\nu, \text{ м}^2/\text{с}$

Лицевая сторона бланка отчета

