

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Строительства, теплоэнергетики и транспорта

ГИДРОМЕХАНИКА

**Методические указания
к контрольным работам**

для курсантов по направлению подготовки

26.05.06 Эксплуатация судовых энергетических установок,
специализация «Эксплуатация главной судовой двигательной установки»

Мурманск

2026

Составитель - Караченцева Яна Марсильевна, ст. преподаватель кафедры Строительства, теплоэнергетики и транспорта

МУ к контрольным работам рассмотрены и одобрены на заседании кафедры-разработчика Строительства, теплоэнергетики и транспорта 22 мая 2026 г. протокол № 6.

Рецензент – Малышев В.С., к.т.н., профессор

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Список рекомендуемой литературы.....	5
Общие методические указания.....	5
Теоретические сведения.....	6
Методические указания к расчету.....	15
Приложения.....	18

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Гидромеханика» для курсантов по направлению подготовки 26.05.06 Эксплуатация судовых энергетических установок, специализация «Эксплуатация главной судовой двигательной установки».

Для изучения дисциплины и закрепления лекционного материала учебным планом предусмотрено выполнение двух контрольных работ для очной формы обучения и одной для заочной формы обучения по теме Гидравлические струи. Силовое воздействие на преграду.

Задание предусматривает решение следующих задач:

1. Определение параметров свободной затопленной турбулентной струи (круглой и плоской).
2. Вычерчивание поперечных профилей распределения скоростей для плоской и круглой струи.
3. Расчет силового воздействия круглой струи на твердую преграду для отверстия и двух типов насадков (внешний цилиндрический и коноидальный).

Варианты заданий приведены в *Приложении 1*.

Для заочной формы обучения предусматривается только расчет плоской струи.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемьева, Т.В. Гидравлика, гидромашины и гидропривод / Т.В. Артемьева. - Академия, 2013
2. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика / Д.В. Штеренлихт. - М.: Колос, 2014
3. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика. [Электронный ресурс]: Учебники - Электрон. дан. - СПб.: Лань, 2015. - 656 с. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/64346>
4. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. /Т.М. Башта. – Издательский дом Альянс, 2010
5. Осипов, П.Е. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. / П.Е. Осипов. – М.: Машиностроение, 1982

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

При решении контрольных работ необходимо:

- правильно записать условие задачи и перевести все величины в систему СИ;
- решение задач сопровождать кратким пояснением: по какой формуле определяется каждая величина, какие величины подставляются в формулу и их размерности;
- вычисления выполнять в развернутом виде со ссылками на используемый справочный материал с указанием номера по списку и страницы, где была взята информация (например, [1], с.25);

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Струей называют поток жидкости или газа, движущийся в жидкой или газовой среде.

Струи классифицируются по ряду признаков. В зависимости от степени влияния среды на движение струи различают затопленные и незатопленные струи. Струя называется **затопленной**, если она движется в среде, обладающей теми же физико-механическими свойствами, что и сама струя (воздушные струи в воздухе, водяные струи в воде и т.п.). При движении между затопленной струей и средой происходит непрерывный массообмен, в процессе которого масса струи постоянно увеличивается. К **незатопленным** струям относят жидкие струи в газовой среде, жидкие струи в жидкостях, не смешивающихся с ними, струи газа в жидкости. При их движении массообмен между средой и струей практически отсутствует.

В зависимости от влияния на струю твердых границ струи подразделяются на свободные и ограниченные. **Свободной** называется струя, движущаяся в неограниченном пространстве (твердые границы не оказывают влияния на характер движения струи). В противном случае струя называется **ограниченной** (несвободной).

По форме поперечного сечения струи делят на круглые (например, струя вытекает через отверстие или насадок круглой формы) и плоские (например, струя вытекает через отверстие прямоугольной формы или щель).

Режим движения струи может быть ламинарным или турбулентным. Наибольшее практическое значение имеют турбулентные струи.

Свободные затопленные турбулентные струи

При истечении в неподвижную однородную жидкость струя постепенно расширяется и на некотором расстоянии от выходного сечения рассеивается в ней (*Рисунок 1*). Давление по длине струи сохраняется

постоянным и равным давлению в окружающем пространстве. Количество движения по длине струи также не изменяется.

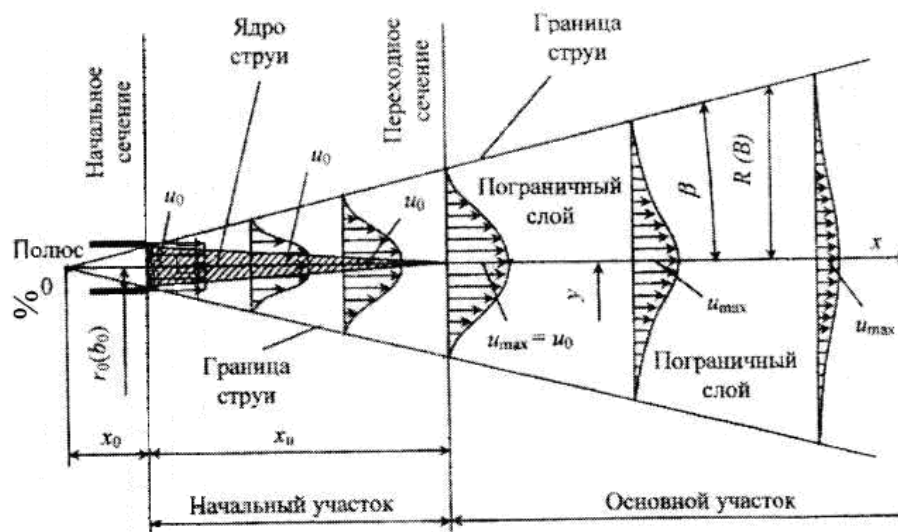


Рисунок 1 - Схема движения свободной затопленной турбулентной струи

За начало струи принимается выход ее из отверстия, насадка или щели. Это сечение называется **начальным**. Струя взаимодействует с окружающей средой и расширяется. В центральной части струи скорости остаются постоянными, а на периферии постепенно снижаются до нуля. Зона постоянных скоростей u_0 называется **ядром струи**, а зона переменных скоростей - **пограничным слоем**. С увеличением координаты x (Рисунок 1) толщина ядра уменьшается, а пограничного слоя увеличивается. Сечение, где ядро с равномерным распределением скоростей исчезает, называется **переходным**. Расстояние между начальным и переходным сечениями называют **начальным участком**. Остальная часть струи (за переходным сечением) называется **основным участком**.

На основном участке с возрастанием координаты x максимальная скорость струи u_{max} на ее оси постепенно уменьшается до нуля. Границы струи с невозмущенной средой для плоской струи (толщиной $2B$) являются плоскостями, проходящими через кромки насадка, и пересекаются на расстоянии x_0 до начального сечения. Проекция линии пересечения на ось

чертежа (*Рисунок 1*) называется **полюсом**. Для круглой струи радиусом R ее внешней границей является коническая поверхность с вершиной в полюсе струи.

Угол расширения струи β (для круглой струи половина угла конусности) зависит от степени турбулентности струи и находится в пределах $12...14^\circ$. Эпюры распределения скоростей на основном участке струи имеют универсальный характер, т.е. их профили подобны. Осредненные скорости в произвольных точках струи в пределах основного участка определяются по формуле Шлихтинга:

$$u = u_{\max} (1 - \eta^{1,5})^2, \quad (1)$$

где η - относительное расстояние от рассматриваемой точки до оси струи.

Основные расчетные зависимости для круглых и плоских свободных затопленных турбулентных струй приведены в *Таблице 1*.

Таблица 1 - Основные расчетные зависимости

Параметр	Круглая струя	Плоская струя
Коэффициент турбулентной структуры, a	0,08	0,09-0,12
Половина угла расширения, $tg\beta$	3,4a	2,4a
Расстояние от полюса до начального сечения, x_0	$\frac{0,29r_0}{a}$	$\frac{0,41b_0}{a}$
Длина начального участка, x_n	$\frac{0,67r_0}{a}$	$\frac{1,03b_0}{a}$
Радиус R или полутолщина B струи	$\left(\frac{3,4ax'}{r_0} + 1 \right) \cdot r_0$	$\left(\frac{2,4ax'}{b_0} + 1 \right) \cdot b_0$

Скорость на оси основного участка, u_{max}	$\frac{0,96u_0}{\frac{ax'}{r_0} + 0,29}$	$\frac{1,2u_0}{\sqrt{\frac{ax'}{b_0} + 0,41}}$
Расход на основном участке, Q	$2,2Q_0 \cdot \left(\frac{ax'}{r_0} + 0,29 \right)$	$1,2Q_0 \cdot \left(\frac{ax'}{b_0} + 0,29 \right)$

Примечание:

x' - расстояние между начальным и рассматриваемым сечением;

Q_0 - расход жидкости в начальном сечении.

Силовое воздействие струи на преграду

Струя жидкости, вытекающая из отверстия или насадка, встречающаяся на своем пути твердую преграду, воздействует на нее с силой, называемой **силой давления струи**.

Указанное явление наблюдается во многих практических случаях, например: при ударе струи жидкости о лопатки активных гидравлических турбин и водяных колес; при ударе струи, вытекающей из брандспойта; при гидроразмыве грунта и т.д.

Явление ударного действия струи жидкости на преграду используется в нефтяном деле при бурении скважин. Промывочная жидкость, поступающая в скважину по колонне бурильных труб, выходит на забое из промывочных отверстий долота под большим давлением. Струи вытекающей жидкости приобретают высокую скорость и смывают с поверхности забоя обломки разбуренной породы, а при бурении в мягких породах и породах средней крепости могут и разрушать их. Эффективность динамического воздействия струи на породу значительно повышается, если снабдить промывочные отверстия насадками. Применение насадков, наиболее совершенных с гидравлической точки зрения (с закругленными входными кромками, конически сходящихся,

коноидальных), позволяет получить компактную струю и увеличить силу ее ударного воздействия на породу.

Сила динамического воздействия струи на забое характеризуется длиной участка ядра струи x_n (Рисунок 1). С увеличением этой длины возрастает проникающая и поражающая способность струи, как следствие, возрастает гидромониторный эффект и происходит более интенсивное разрушение породы.

Гидравлические струи могут применяться и для вызова притока жидкости к скважине. На колонне бурильных труб в скважину опускается специальное устройство с насадками из высокопрочных сплавов. Смесь жидкости с песком через бурильные трубы подается к насадкам. Струя, выходящая из насадка с большой скоростью, воздействует на обсадные трубы, цементный камень, призабойную зону пласта и разрушает их в определенных местах. Таким образом, образуются отверстия (перфорация), заполненные песком, через которые впоследствии в скважину поступает жидкость или газ.

Рассмотрим динамическое воздействие компактной части струи на произвольную твердую поверхность (Рисунок 2).

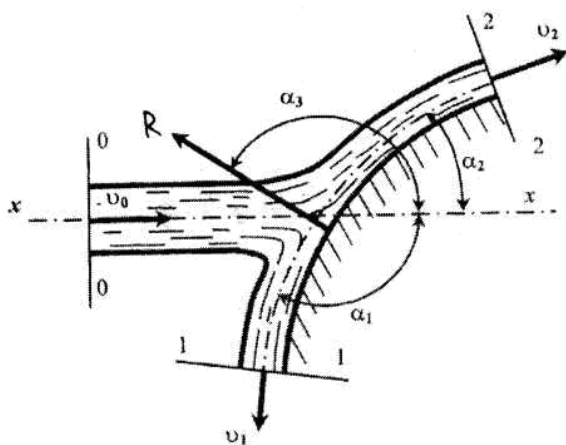


Рисунок 2 - Давление плоской струи на твердую поверхность произвольного очертания

Предполагаем, что струя плоская, жидкость идеальная, на участке растекания струи между сечениями 1-1 и 2-2 давление в любой точке постоянное. тогда силу давления струи на твердую поверхность определяют для отсека жидкости, ограниченного сечениями 0-0, 1-1 и 2-2 в проекции на ось $x-x$ с помощью уравнения изменения количества движения:

$$R \cos \alpha_3 = \rho \cdot (Q_1 v_1 \cos \alpha_1 + Q_2 v_2 \cos \alpha_2 - Q_0 v_0), \quad (2)$$

где Q_0, Q_1, Q_2 - расходы жидкости соответственно в сечениях 0-0, 1-1 и 2-2;

v_1, v_2, v_3 - скорости движения жидкости соответственно в сечениях 0-0, 1-1 и 2-2;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - углы наклона твердой поверхности и ее реакции к оси струи.

Уравнение не всегда разрешимо, так как часто бывают неизвестны величины R, α_3, Q_1 или Q_2 (так как $Q_0 = Q_1 + Q_2$).

Уравнение изменения количества движения упрощается при воздействии струи на твердую преграду, расположенную симметрично относительно оси $x-x$ (Рисунок 3).

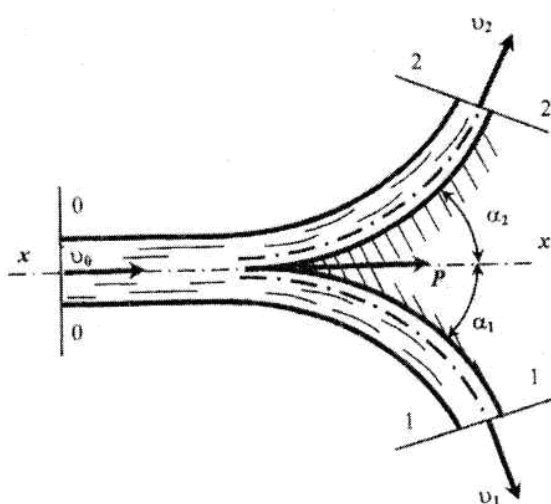


Рисунок 3 - Давление плоской струи на твердую поверхность, симметричную относительно оси движения струи

В этом случае:

$$Q_1 = Q_2 = \frac{1}{2} Q_0; \quad \alpha_1 = \alpha_2; \quad \cos \alpha_3 = -1 \quad (3)$$

Сила давления P по величине будет равна реакции твердой поверхности R , но направлена в противоположную сторону: $P = -R$. Тогда формула (2) имеет вид:

$$P = \rho Q_0 v_0 (1 - \cos \alpha) = \rho \omega_0 v_0^2 (1 - \cos \alpha) \quad (4)$$

Анализ уравнения показывает, что с изменением угла α меняется сила давления струи. В случае если угол $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha = 90^\circ$, будем иметь перпендикулярное воздействие струи на плоскую преграду (Рисунок 4).

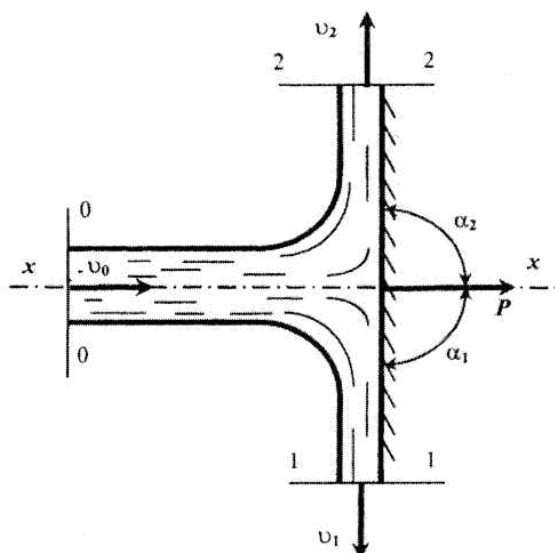


Рисунок 4 - Давление горизонтальной струи на твердую вертикальную поверхность

Тогда:

$$P = \rho Q_0 v_0 = \rho \omega_0 v_0^2, \quad (5)$$

где ω_0 - площадь сечения 0-0.

Формула может быть применена и при расчете силы давления круглой струи на плоскую стенку. Фактическое значение силы P оказывается несколько меньшим в связи с искривлением линий тока при растекании струи:

$$P_{кр} = k_n \rho \omega_0 v_0^2, \quad (6)$$

где k_n -коэффициент, определяемый влиянием неучтенных факторов, равный 0,92...0,96%.

Сила давления струи увеличивается, если твердая преграда представляет собой криволинейную поверхность, отклоняющую струю жидкости (Рисунок 5).

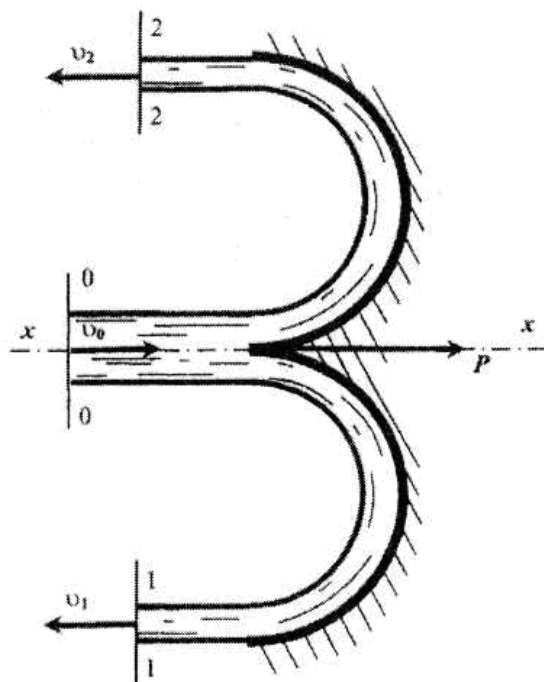


Рисунок 5 - Давление струи на криволинейную поверхность, симметричную относительно оси движения струи, ($\alpha = 180^\circ$)

При $\alpha_1 = \alpha_2 > 90^\circ$ сила давления с увеличением отклонения струи растет и достигает наибольшего значения при $\alpha_1 = \alpha_2 = 180^\circ$ или $\cos\alpha_1 = \cos\alpha_2 = -1$. В этом случае формула (4) примет вид:

$$P = 2\rho\omega_0 v_0^2 \quad (7)$$

Рассмотрим случай, когда твердая преграда представляет плоскость, расположенную под углом α к оси струи (Рисунок 6).

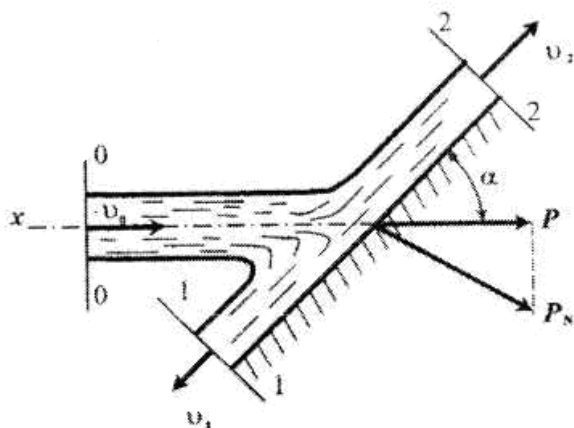


Рисунок 6 - Давление струи на плоскую твердую поверхность, наклоненную на угол α

В этом случае сила давления плоской струи на преграду в направлении действия струи составит:

$$P = \rho \omega_0 v_0^2 \sin^2 \alpha, \quad (8)$$

а сила нормального давления:

$$P_N = \rho \omega_0 v_0^2 \sin \alpha, \quad (9)$$

Для круглой струи эти силы соответственно будут равны:

$$P_{кр} = k_n \rho \omega_0 v_0^2 \sin^2 \alpha, \quad (10)$$

$$P_{Nкр} = k_n \rho \omega_0 v_0^2 \sin \alpha \quad (11)$$

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТУ

Исходные данные определяют согласно варианту задания из *Приложения 1*. Вычерчивают расчетную схему движения свободной затопленной турбулентной струи (*Рисунок 1*). Определяют скорость u_0 и расход струи Q_0 в начальном сечении, используя формулы:

$$u_0 = \varphi \sqrt{2gH_{np}},$$

где φ - коэффициент скорости (*Приложение 2*);

H_{np} - приведенный напор, м.

Приведенный напор:

$$H_{np} = \frac{\Delta p}{\rho g},$$

$$Q_0 = \mu \omega \sqrt{2gH_{np}},$$

где μ - коэффициент расхода (*Приложение 2*);

ω - площадь поперечного сечения:

$$\omega = 2b_0 l_0 - \text{для плоского отверстия}$$

где $l_0 = 20b_0$ - ширина отверстия, м.

$$\omega = \pi b_0^2 - \text{для круглого отверстия}$$

По формулам, приведенным в *Таблице 1*, рассчитывают коэффициент турбулентной структуры a , половину угла расширения β , расстояние от полюса до начального сечения x_0 , длину начального участка x_n . Расчетные значения радиуса r или полутолщины струи B , скорости на оси основного участка струи u_{max} , расхода на основном участке Q целесообразно представить в табличной форме (*Таблица 2*).

Таблица 2 - Сводная таблица по расчету струй

Сечения	Плоская струя			Круглая струя		
	B , м	u_{max}	Q , м ³ /с	B , м	u_{max}	Q , м ³ /с

		м/с			м/с	
$x' = 0$						
$x' = x_H$						
$x' = 2x_H$						
$x' = 4x_H$						

Поперечные профили распределения скоростей в сечениях струи рассчитывают по формуле (1). Радиус R или полутолщину струи B разбивают на отрезки через $0,2B$. Результаты расчетов представляют в табличной форме для четырех сечений (Таблица 3). Расчеты выполняют для плоской и круглой струи.

Таблица 3 - Расчет для построения поперечных профилей распределения скоростей

Сечения	Параметры струи	Относительное расстояние от рассматриваемой точки до оси струи, η					
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$x' = 0$	Скорость струи в точке u , м/с						
	Абсолютное расстояние от точки до оси струи ηB , м						
...							

По результатам расчетов в масштабе на лист формата А4 наносят сечения и вычерчивают поперечные профили распределения скоростей отдельно для плоской и круглой струи в одинаковом масштабе. Результаты расчетов сравнивают и делают выводы.

Силовое воздействие круглой струи на твердую преграду рассчитывают при тех же исходных данных по формулам (6, 10, 11). Расчет выполняют для отверстия и двух типов насадков (внешний цилиндрический и коноидальный), $\alpha = 45^\circ$. Результаты расчетов сравнивают и делают выводы.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Таблица 1 - Исходные данные для расчета гидравлических струй

Наименование показателя	Варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Перепад давления, Δp , МПа	Для первой цифры варианта									
	0,08	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28
Относительная плотность жидкости, δ	Для второй цифры варианта									
	1,08	1,10	1,12	1,14	1,16	1,08	1,20	1,22	1,24	1,26
Радиус r_0 или полувысота отверстия b_0 , мм	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Приложение 2

Таблица 1 - Коэффициенты скорости φ , сжатия ε , расхода μ истечения жидкости через отверстия и насадки

Тип отверстия или насадка	φ	ε	μ
Малое отверстие в тонкой стенке	0,97	0,64	0,62
Наружный цилиндрический насадок	0,82	1,00	0,82
Внутренний цилиндрический насадок	0,71	1,00	0,71
Конический сходящийся насадок	0,96	0,98	0,95
Конический расходящийся насадок	0,45	1,00	0,45
Конический насадок	0,98	1,00	0,98