

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

О. В. Акимов

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗОВ

Методическое пособие
по выполнению контрольной работы

Хабаровск
2018

УДК 532.(075.8)
ББК Ж123
А 391

Рецензент – доцент кафедры «Гидравлика и водоснабжение» ДВГУПС
А.Н. Ганус.

Акимов О. В.

А391 Механика жидкости и газов : метод. пособие по выполнению контрольной работы. – Хабаровск: ДВГУПС, 2018. – 31 с.: ил.

Методическое пособие соответствует рабочей программе дисциплины «Механика жидкости и газов».

В пособии приведены краткие теоретические сведения и методические указания по решению задач.

Пособие предназначено для студентов 2-го курса заочной формы обучения изучающих дисциплину «Механика жидкости и газов» по направлению 08.03.01 «Строительство».

УДК 532.(075.8)
ББК Ж123

© ДВГУПС, 2018

ОГЛАВЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛАВЛЕНИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ	5
ЗАДАЧА 1	6
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ	7
2.1. Гидростатическое давление	7
2.2. Аналитический способ определения силы давления и центра давления	7
ЗАДАЧА 2	8
2.3. Графоаналитический способ определения силы давления и центра давления	10
ЗАДАЧА 3	10
2.4. Определение сил гидростатического давления на криволинейные поверхности	11
ЗАДАЧА 4	12
3. ОСНОВЫ ГИДРОДИНАМИКИ	12
3.1. Гидравлические элементы потока	12
3.2. Уравнение Бернулли	13
3.3. Два режима движения жидкости	14
3.4. Гидравлические сопротивления	14
ЗАДАЧА 5	16
ЗАДАЧА 6	17
ЗАДАЧА 7	21
4. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ МАЛЫЕ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ	22
4.1. Истечение жидкости через малые отверстия в тонкой стенке	22
4.2. Истечение жидкости через насадки	23
ЗАДАЧА 8	25
5. РАВНОМЕРНОЕ БЕЗНАПОРНОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ	25
ЗАДАЧА 9	27
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	29
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	29
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	29
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	30
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	30
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	30
ПРИЛОЖЕНИЕ 7	31
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	31

ВВЕДЕНИЕ

«Механика жидкости и газа» – один из фундаментальных общетехнических курсов в системе подготовки бакалавров направления 08.03.01 «Строительство». Предметом изучения курса являются основные законы равновесия и движения жидкости.

При изучении дисциплины студент должен выполнить контрольную работу. Контрольная работа охватывает наиболее важные разделы дисциплины и существенно облегчает ее систематическое изучение.

Перед решением задач студент должен проработать соответствующий раздел по учебникам, приведенным в библиографическом списке [1-2].

Исходные данные для решения задач студент получает на кафедре.

При выполнении контрольной работы необходимо руководствоваться следующим:

1. Работу следует оформлять рукописно или на компьютере на одной стороне листа. Это необходимо для рецензирования и исправлений. Страницы должны быть пронумерованы.

2. Записывать условие задачи с исходными данными и четко выполненными чертежами к задачам.

3. Решение задач вести поэтапно, с пояснениями каждого хода решения.

4. Перед вычислением искомых величин следует вначале написать расчетную формулу в буквенном выражении, затем подставить численные значения всех входящих в нее параметров и привести окончательный ответ.

5. У всех размерных величин должна быть проставлена размерность. Размерность величин выражается в Международной системе единиц СИ.

6. Значения всех коэффициентов следует обосновать ссылкой на таблицы, приведенные в тексте или в приложениях.

7. При построении расчетных графиков необходимо указывать величины, откладываемые по осям графика, с обозначением их размерностей.

8. Все отмеченные ошибки должны быть исправлены, а сделанные указания выполнены. Исправлять ошибки следует отдельно по каждой задаче на чистой стороне листа.

Контрольную работу, выполненную с вышеуказанными требованиями, студент должен сдать на кафедру для регистрации и проверки.

Работа может быть зачтена только в том случае, если она не содержит принципиальных и грубых арифметических ошибок.

К зачету по дисциплине студент допускается только после защиты им контрольной работы.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

Жидкостью называется физическое тело, обладающее текучестью и весьма малой изменяемостью своего объема.

Жидкость, как физическое тело, характеризуется физическими свойствами, важнейшими из которых являются:

Плотность ρ – это масса единицы объема жидкости, кг/м^3

$$\rho = \frac{m}{W}, \quad (1.1)$$

где m – масса жидкости, кг ; W – объем, м^3 .

Плотность жидкостей уменьшается с увеличением температуры. Исключение представляет вода в диапазоне температур от 0°C до 4°C , когда ее плотность увеличивается, достигая, наибольшего значения при температуре 4°C $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Сопротивление жидкостей изменению своего объема под действием давления и температуры характеризуется коэффициентами объемного сжатия и температурного расширения.

Коэффициент объемного сжатия β_W – это относительное изменение объема жидкости при изменении давления на единицу, Па^{-1} :

$$\beta_W = \frac{\Delta W}{W \Delta p}, \quad (1.2)$$

где ΔW – изменение объема, W , соответствующие изменению давления на величину Δp , м^3 .

Коэффициент температурного расширения β_t – это относительное изменение объема жидкости при изменении температуры на один градус, $^\circ\text{C}^{-1}$:

$$\beta_t = \frac{\Delta W}{W \Delta t}, \quad (1.3)$$

где ΔW – изменение объема W , соответствующее изменению температуры на величину Δt , м^3 .

Для воды коэффициент температурного расширения β_t с возрастанием температуры и давления увеличивается.

Вязкость – свойство жидкости оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой. Вязкость проявляется только при движении жидкости и сказывается на распределении скорости по живому сечению потока (рис. 1.1.).

Согласно гипотезе Ньютона сила внутреннего трения T в жидкостях пропорциональна градиенту изменения скорости $\frac{du}{dy}$, площади слоев S , зависит от рода жидкости:

$$T = \mu S \frac{du}{dy}, \quad (1.4)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Если силу трения T отнести к единице площади соприкасающихся слоев, то получится величина касательного напряжения, Н/м²

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}. \quad (1.5)$$

В практике для характеристики вязкости жидкости применяют коэффициент кинематической вязкости ν . Коэффициент кинематической вязкости равен отношению коэффициента динамической вязкости к плотности жидкости, м²/с:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (1.6)$$

Вязкость жидкости зависит от рода жидкости и от температуры. С повышением температуры вязкость жидкости уменьшается. Зависимость коэффициента кинематической вязкости воды от температуры может определяться по [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#) или по эмпирической формуле:

$$\nu = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337 t + 0,000221 t^2}. \quad (1.7)$$

ЗАДАЧА 1

Участок трубопровода заполнен водой при атмосферном давлении. Требуется определить повышение давления в трубопроводе при нагреве воды на Δt и закрытых задвижках на концах участка.

Примечание. Коэффициенты температурного расширения и объемного сжатия принять $\beta_t = 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\beta_W = 5 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$

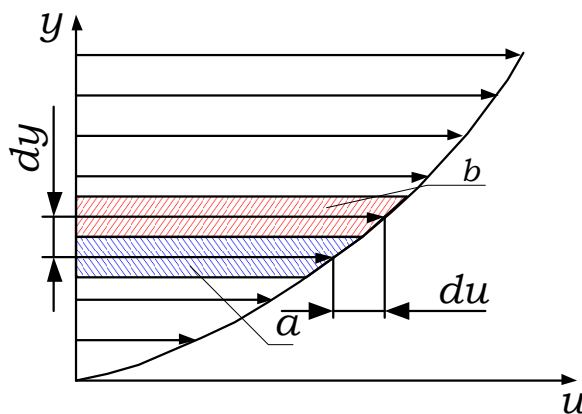


Рис. 1.1. Эпюра скорости

Указания к решению задачи 1

При решении задачи необходимо воспользоваться формулами для определения коэффициентов объемного сжатия и температурного расширения

$$\beta_W = \frac{\Delta W}{W \Delta p}; \quad \beta_t = \frac{\Delta W}{W_0 \Delta t},$$

где ΔW – изменение начального объема, соответствующее изменению давления на величину Δp , Па, или температуры на величину Δt , °С; W_0 – начальный объем, занимаемый жидкостью, до ее нагрева, м³; W – начальный объем, занимаемый жидкостью при атмосферном давлении после ее нагрева, м³.

Из этих формул находится искомая величина Δp при изменении температуры на заданную величину Δt .

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

2.1. Гидростатическое давление

Гидростатическим давлением называется сжимающее напряжение, возникающее в жидкости находящейся состоянии покоя.

Если на жидкость действует только сила тяжести, то абсолютное гидростатическое давление в точке на глубине h определяется по формуле, Па

$$p = p_0 + \rho g h, \quad (2.1)$$

где p_0 – давление на свободной поверхности жидкости, Па; $\rho g h$ – весовое давление, Па.

Разность абсолютного и атмосферного давления называется *избыточным* или *манометрическим* давлением.

Недостаток абсолютного давления до атмосферного называется *вакуумметрическим* давлением или *вакуумом*.

2.2. Аналитический способ определения силы давления и центра давления

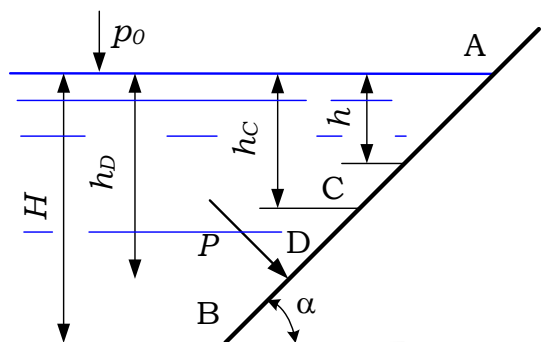


Рис. 2.1

Задача сводится к определению величины силы давления и точки ее приложения.

На рис 2.1 показана плоская стенка АВ, наклоненная под углом α к горизонту. Слева от стенки находится жидкость. Центр тяжести поверхности расположен в точке С, точка приложения силы давления в D, расстояние от этих точек до свободной поверхности по вер-

тикали – через h_C и h_D .

Сила избыточного гидростатического давления на плоскую поверхность выражается произведением гидростатического давления в центре тяжести поверхности p_C на ее площадь ω , Н

$$P = p_C \omega \text{ или } P = \rho g h_C \omega. \quad (2.2)$$

Направлена сила по нормали к плоскости поверхности.

Глубина погружения центра давления определяется по формуле, м

$$h_D = h_C + \frac{I_C}{h_C \omega} \sin^2 \alpha, \quad (2.3)$$

где I_C – момент инерции смоченной площади стенки относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести этой площади, м^4 .

Уравнение (2.3) показывает, что центр давления D всегда лежит ниже центра тяжести C, только при горизонтальном положении плоской поверхности центр тяжести и центр давления совпадают.

ЗАДАЧА 2

Определить коэффициент устойчивости, относительно ребра О, подпорной стенки, свободно покоящейся на непроницаемом основании рис. 2.4. Расчет выполнить для 1 погонного метра (п. м.) стенки. Плотность стенки ρ_c , плотность воды $\rho_e = 1000 \text{ кг/м}^3$; ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Требуется определить:

1. Силы избыточного гидростатического давления на 1 погонный метр длины стенки.
2. Положение центров давления.
3. Запас устойчивости k подпорной стенки на опрокидывание.

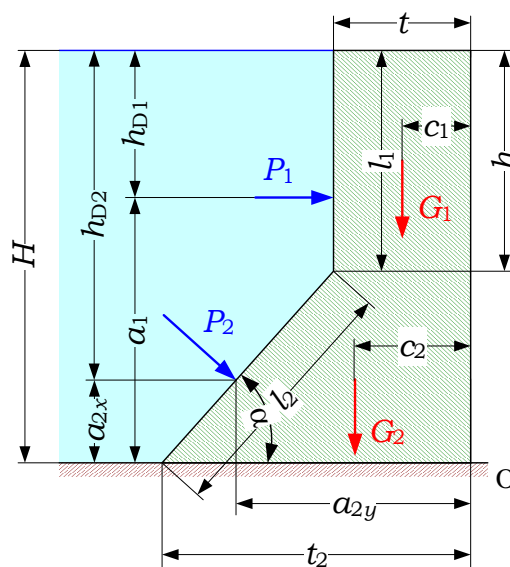


Рис. 2.4

Указания к решению задачи 2

Силы избыточного гидростатического давления на плоскую стенку вычисляются по $P = p_C \omega$ или $P = \rho g h_C \omega$. (2.2).

Глубина погружения центров давления определяется по [выше](#).

Для плоской прямоугольной фигуры момент инерции смоченной плоской площадки относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести, определяется по формуле, м^4

$$I_i = \frac{bl_i^3}{12}.$$

где b – ширина прямоугольника равная 1 п. м.; l – высота прямоугольника, м.

Определив силы избыточного гидростатического давления P_1 , P_2 и точки их приложения h_{D1} и h_{D2} можно найти опрокидывающие моменты, создаваемые силами гидростатического давления относительно точки О, Н·м:

$$M_{onp1} = P_1 a_1; \quad M_{onp2} = P_{2x} a_{2x} - P_{2y} a_{2y}.$$

Плечи опрокидывающих моментов равны, м:

$$a_1 = H - h_{D1}; \quad a_{2x} = H - h_{D2}; \quad a_{2y} = t + \frac{h_{D2} - h}{tg\alpha}.$$

Удерживающие моменты создаваемые силами тяжести относительно точки О равны, Н·м:

$$M_{y\partial i} = G_i c_i,$$

где G – вес элементов подпорной стенки, Н; c – плечи удерживающих моментов, м.

Силы тяжести элементов подпорной стенки равны, Н

$$G_i = \rho_c g W_i,$$

где W – объем элемента подпорной стенки, м³.

Плечи удерживающих моментов вычисляются по формулам, м:

$$c_1 = \frac{t}{2}, \quad c_2 = \frac{t_2 t + \frac{1}{3}(t_2 - t)^2}{t_2 + t},$$

где t – основания трапеций, м.

Запас устойчивости на опрокидывание равен отношению удерживающего момента относительно точки О к опрокидывающему моменту:

$$k = \frac{\sum M_{y\partial}}{\sum M_{onp}}.$$

2.3. Графоаналитический способ определения силы давления и центра давления

Сила гидростатического давления на прямоугольную фигуру может быть выражена произведением площади эпюры гидростатического давления F на ширину фигуры b .

Вектор силы давления P проходит через центр тяжести эпюры гидростатического давления. Пересечение вектора силы давления с поверхностью, в пределах которой действует давление, определяет положение центра давления D .

Центр тяжести треугольной эпюры давления расположен в точке пересечения медиан треугольника.

Варианты определения центра тяжести эпюр давления трапецидальной формы графическими методами показаны на рис. 2.2.

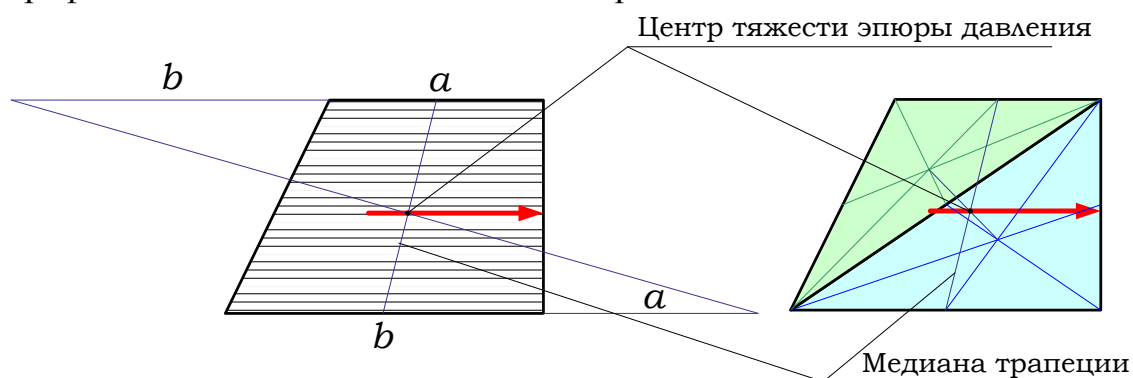


Рис. 2.2

ЗАДАЧА 3

Решить задачу 2 используя для нахождения сил гидростатического давления и плеч опрокидывающих моментов графический способ.

Указания к решению задачи 3

По формуле (2.1) определяются избыточные гидростатические давления на глубинах h и H . Вычерчивается стенка (рис. 2.4) в масштабе 1:50. Строятся эпюры гидростатического давления. Величины избыточных давлений на эпюрах можно откладывать в масштабе 1:10 000.

Вычисляются площади эпюр. Силы гидростатического давления равны соответствующим площадям эпюр.

Определяются центры тяжести эпюр. Центр тяжести эпюры имеющей вид трапеции находится одним из способов, приведенных на рис. 2.2. Через центры тяжести эпюр проводятся нормально к стенке линии действия сил гидростатического давления. Из точки O на линии действия сил опускаются перпендикуляры. Полученные отрезки являются плечами опрокидывающих моментов.

2.4. Определение сил гидростатического давления на криволинейные поверхности

В общем случае для определения силы гидростатического давления по величине и направлению достаточно вычислить ее проекции на взаимно перпендикулярные направления, например на оси координат. В этом случае величина силы гидростатического давления определяется по формуле, Н

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}. \quad (2.4)$$

Направление силы давления определяется углом, образуемым вектором силы и горизонтальной плоскостью

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{P_y}{P_x}. \quad (2.5)$$

Горизонтальная составляющая силы гидростатического давления на криволинейную поверхность равна силе давления на вертикальную проекцию криволинейной поверхности и проходит через центр давления вертикальной проекции

$$P_x = \rho g h_C \omega_y. \quad (2.6)$$

Вертикальная составляющая силы гидростатического давления на криволинейную поверхность равна весу жидкости в объеме тела давления

$$P_y = \rho g W. \quad (2.7)$$

Объем W называется телом давления и представляет собой объем, ограниченный криволинейной поверхностью АВ, проекцией ее на плоскость свободной поверхности АО и проекцией на вертикальную плоскость ВО (см. рис. 2.3.)

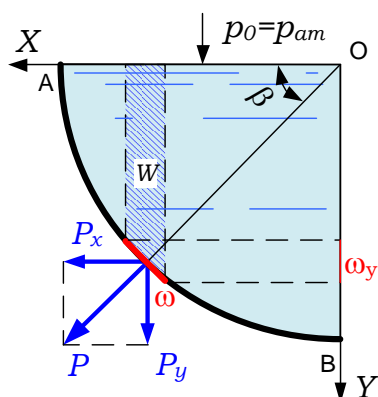


Рис. 2.3

Направление вертикальной составляющей P_y (вверх или вниз) определяется взаимным расположением жидкости и поверхности. Если тело давления образовано жидкостью (положительное тело давления), то вертикальная составляющая направлена вниз, если же тело давления находится вне жидкости (отрицательное тело давления), то P_y направлена вверх. Вертикальная составляющая силы давления жидкости на криволинейную поверхность проходит через центр тяжести тела давления.

ЗАДАЧА 4

Заменить в условии задачи 2 наклонную стенку цилиндрической стенкой радиусом $H - h$ (см. рис. 2.4). Найти момент, создаваемый силой гидростатического давления действующей на криволинейную поверхность.

Указания к решению задачи 4:

По формуле (2.6) находится горизонтальная составляющая силы гидростатического давления действующей на цилиндрическую поверхность. Глубина погружения центра тяжести цилиндрической поверхности, используемая в этой формуле, м

$$h_C = h + \frac{H - h}{2} = \frac{H + h}{2}.$$

Вычисляется вертикальная составляющая силы гидростатического давления действующей на цилиндрическую поверхность по [выше](#). Объем тела давления равен площади тела давления (рис. 2.4) умноженной на 1 п. м.

По [выше](#) определяется величина силы гидростатического давления действующей на цилиндрическую поверхность.

По [выше](#) рассчитывается угол между направлением действия силы и горизонтальной плоскостью. Линия действия силы проходит через центр кривизны цилиндрической поверхности.

Из геометрических соображений находится величина плеча a момента создаваемого силой гидростатического давления, м

$$a = \frac{(t + H - h)P_y - (H - h)P_x}{P}.$$

Вычисляется величина момента создаваемого силой гидростатического давления, Н·м

$$M_{\text{опр}} = Pa.$$

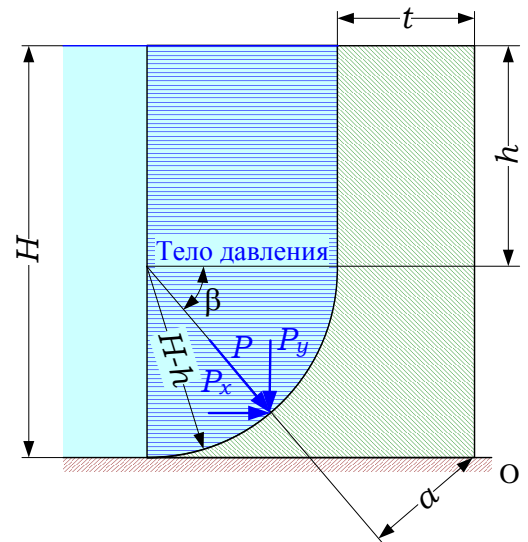


Рис.2.4.

3. ОСНОВЫ ГИДРОДИНАМИКИ

3.1. Гидравлические элементы потока

Основными гидравлическими элементами потока являются: площадь живого сечения, смоченный периметр и гидравлический радиус.

Живым сечением потока называется поперечное сечение потока, проведенное нормально направлению движения жидкости. Площадь живого сечения обозначается ω .

Смоченным периметром χ , м, называется длина части периметра живого сечения, на которой поток соприкасается с твердыми стенками.

Гидравлическим радиусом называется отношение площади живого сечения к смоченному периметру, м

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (3.1)$$

Расходом жидкости Q называется количество жидкости, протекающее через данное сечение потока в единицу времени. Расход равен произведению площади живого сечения на среднюю скорость, м³/с

$$Q = \omega v. \quad (3.2)$$

3.2. Уравнение Бернулли

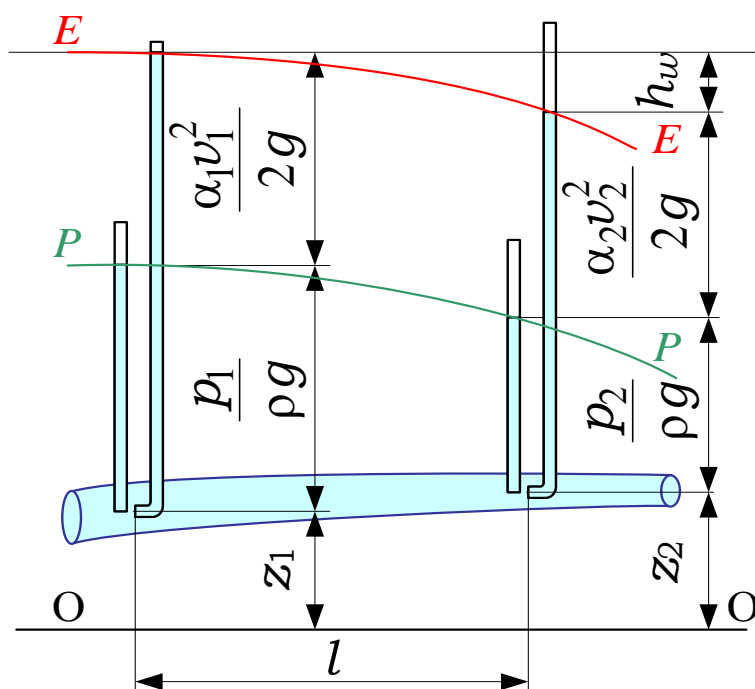


Рис. 3.1

Основной задачей гидродинамики является изучение законов движения жидкости. Движение жидкости характеризуется скоростями движения частиц и давлением в отдельных точках потока.

Взаимосвязь между гидродинамическим давлением и скоростью движущейся жидкости и геометрической высотой в различных сечениях потока устанавливает уравнение Д. Бернулли (см. рис. 3.1).

Для потока реальной жидкости уравнение Д. Бернулли имеет вид

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w, \quad (3.3)$$

где z_1 и z_2 – геометрические высоты (удельные, т.е. отнесенные к единице веса жидкости, потенциальные энергии положения), м; $\frac{p_1}{\rho g}$ и $\frac{p_2}{\rho g}$ – удельные потенциальные энергии давления, м; $\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}$ и $\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}$ – скоростные напоры (удельные кинетические энергии), м; h_w – потери напора (удельная энергия, затрачиваемая на преодоление сопротивления движению), м; p_1 и p_2 – гидродинамические давления, Па; v_1 и v_2 – средние скорости движения жидкости в рассматриваемых сечениях, м/с; α_1 и α_2 – коэффициенты кинетической энергии, величина которых зависит от степени неравномерности распределения скоростей по живому сечению потока (при турбулентном режиме движения α принимается равным 1,05 – 1,1).

3.3. Два режима движения жидкости

Существуют два основных режима движения жидкости: ламинарный и турбулентный. При *ламинарном* движении жидкость движется струйками или слоями без перемешивания. При *турбулентном* движении «струйчатость» движения жидкости нарушается: наряду с главным движением вдоль потока частицы совершают сложное движение в поперечном направлении.

Для определения режима движения жидкости используется *критерий Рейнольдса*

$$Re = \frac{v D}{\nu}, \quad (3.4)$$

где v – средняя скорость движения жидкости, м/с; D – диаметр трубопровода, м; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

Число Рейнольдса, при котором происходит смена режима движения жидкости, называется критическим. Критическое число Рейнольдса равно 2320. Если $Re < 2320$, то наблюдается ламинарный режим, в противном случае – турбулентный.

3.4. Гидравлические сопротивления

Потери напора делятся на два вида:

1. потери напора по длине h_l , пропорциональные длине потока и обусловленные силами трения между жидкостью и стенками трубопровода;

2. местные потери напора h_m – потери сосредоточенные на коротких участках потока и обусловленные резкими деформациями потока, изменением скорости потока по величине и направлению.

Потери напора по длине определяются по формуле Дарси, м

$$h_l = \lambda \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g}, \quad (3.5)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения в трубах, l – длина трубопровода, м; D – расчетный внутренний диаметр трубопровода, м.

Коэффициент гидравлического трения может быть найден по формуле Д. А. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{\Delta_9}{D} \right)^{0,25}, \quad (3.6)$$

где Δ_9 – эквивалентная шероховатость, м.

Эквивалентная шероховатость – это искусственная равномерная зернистая шероховатость с таким диаметром зерен, при котором в области квадратичного сопротивления значение коэффициента гидравлического трения равно его значению при естественной шероховатости.

Величина равная отношению потерь напора по длине к длине потока называется *гидравлическим уклоном*

$$I = \frac{h_l}{l}. \quad (3.7)$$

Местные потери напора определяются по формуле Вейсбаха, м

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (3.8)$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления.

Если $D_1 < D_2$ (т.е. имеет место случай внезапного расширения потока) коэффициент местного сопротивления определяется по формуле

$$\zeta = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2. \quad (3.9)$$

Если $D_1 > D_2$ (т.е. внезапное сжатие потока)

$$\zeta = 0,5 \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \right). \quad (3.10)$$

В случае выхода из трубы в резервуар больших размеров коэффициент местного сопротивления равен 1, а в случае входа в трубу 0,5.

Местные потери напора в случае внезапного расширения потока могут также определяться по формуле Борда, м

$$h_{\text{вп}} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}. \quad (3.11)$$

Потери напора в трубопроводах также могут определяться по формуле

$$h_w = K_m A K_1 l Q^2, \quad (3.12)$$

где K_m – коэффициент учитывающий местные сопротивления; A – удельное сопротивление трубы, работающей в квадратичной области сопротивления, для новых стальных и чугунных труб значение принимается по [ПРИЛОЖЕНИЕ 2](#), $\text{с}^2/\text{м}^6$; K_1 – поправочный коэффициент, учитывающий неквадратичность зависимости потерь напора от средней скорости движения воды в трубе.

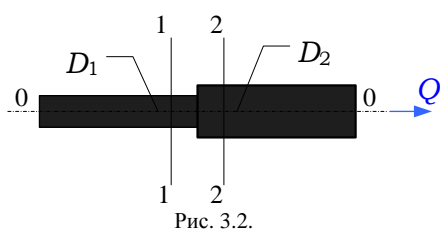
Для не новых стальных и чугунных труб:

если скорость $v \geq 1,2$ м/с, то $K_1 = 1$;

если скорость $v < 1,2$ м/с, то значение K_1 определяется интерполяцией [ПРИЛОЖЕНИЕ 3](#). или по формуле

$$K_1 = 0,852 \left(1 + \frac{0,867}{v} \right)^{0,3}. \quad (3.13)$$

ЗАДАЧА 5



Определить давление p_2 , если расход, протекающий по трубопроводу Q , диаметры труб D_1 и D_2 и давление в начале трубопровода p_1 . Схема трубопровода приведена на рис. 3.2.

Указание к решению задачи 5:

Для определения давления p_2 необходимо для сечений 1–1 и 2–2 составить уравнение Д. Бернулли. Плоскость сравнения 0–0 следует провести по оси трубопровода

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{1-2}$$

где z_1, z_2 – удельные энергии положения, так как плоскость сравнения проведена по оси трубопровода $z_1 = z_2 = 0$, м; p_1, p_2 – давление в центрах тяжести живых сечений 1-1 и 2-2, м; v_1, v_2 – средние скорости движения жидкости в живых сечениях 1-1 и 2-2, м/с; α_1, α_2 – коэффициенты кинетической энергии, принять равными 1; h_{1-2} – потери напора при внезапном расширении, определяемые по [выше](#)

Следовательно, уравнение Д. Бернулли можно записать:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}.$$

Из данного уравнения выразить p_2 .

Средние скорости потока определяются из [выше](#).

ЗАДАЧА 6

Из открытого резервуара, в котором поддерживается постоянный уровень, по стальному трубопроводу (эквивалентная шероховатость $\Delta_s = 1$ мм), состоящему из труб различного диаметра D и различной длины l , вытекает в атмосферу вода, расход которой Q и температура t °С (рис. 3.3). Коэффициент кинетической энергии принять равным 1,1.

Требуется:

1. Определить скорости движения воды и потери напора (по длине и местные) на каждом участке трубопровода.
2. Установить величину напора H в резервуаре.
3. Построить напорную и пьезометрическую линии, с соблюдением масштаба.

Указания к решению задачи 6:

Эта задача решается на основе применения уравнения Д. Бернулли.

Решение задачи выполняется в следующем порядке:

1. Составляется уравнение Д. Бернулли в общем, виде для сечений 0–0 (на свободной поверхности жидкости в резервуаре) и сечения 3–3 (на выходе потока из трубы). При написании уравнения Д. Бернулли следует помнить, что индексы у

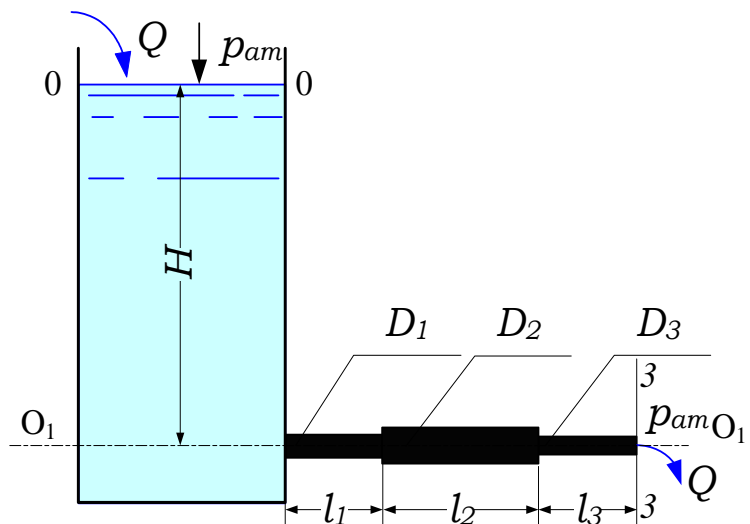


Рис.3.3

всех членов уравнения должны соответствовать номерам рассматриваемых сечений. Например, величины, относящиеся к сечению 0–0, следует обозначать z_0 , p_0 , α_0 , v_0 , а к сечению 3–3 – z_3 , p_3 , α_3 , v_3 .

$$z_0 + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = z_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{\alpha_3 v_3^2}{2g} + h_{0-3}$$

2. Намечается горизонтальная плоскость сравнения. При горизонтальном трубопроводе плоскость сравнения проводится по оси трубопровода. После этого устанавливается, чему равно каждое слагаемое, входящее в уравнение Д. Бернулли, применительно к условиям решаемой задачи. Например, $z_0 = H$ (искомая величина напора в резервуаре); $p_0 = p_{atm}$ (атмосферное давление); $v_0 = 0$ (скорость движения воды в сечении 0–0) и так далее.

3. После подстановки всех найденных величин в уравнение Д. Бернулли и его преобразования записывается расчетное уравнение в буквенном выражении для определения искомой величины H .

4. Определяются скорости движения воды на каждом участке из [выше](#).

5. По скоростям движения воды вычисляются числа Рейнольдса, и устанавливается режим движения на каждом участке. Значение кинематического коэффициента вязкости ν определяют по [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#) или по [выше](#) в зависимости от температуры.

6. Определяются потери напора по длине каждого участка ($h_{l_1}, h_{l_2}, h_{l_3}$) и в каждом местном сопротивлении (вход воды из резервуара $h_{вх}$, внезапное расширение $h_{вр}$ и внезапное сужение $h_{вс}$).

Потери напора по длине определяются по [выше](#). Значения коэффициентов гидравлического сопротивления вычисляются по [выше](#) предварительно вычислив числа Рейнольдса [выше](#).

При вычислении потери напора на вход в трубу коэффициент местного сопротивления $\zeta_{вх}$ равен 0,5.

Потери напора при внезапном сужении потока вычисляют по [выше](#). Значение коэффициента местного сопротивления при внезапном сужении трубопровода $\zeta_{вс}$ берется в зависимости от степени сужения n (отношения площади трубы в узком сечении к площади трубы в широком сечении) по [ПРИЛОЖЕНИЕ 5](#).

Потери напора при внезапном расширении потока определяются по [выше](#).

7. После определения потерь напора по длине и в местных сопротивлениях вычисляется искомая величина – напор H в резервуаре.

$$H = \frac{\alpha_3 v_3^2}{2g} + \sum h_l + \sum h_m.$$

8. Строится напорная линия. Напорная линия показывает, как изменяется полный напор: (полная удельная энергия) по длине потока. Значения H откладываются вертикально вверх от осевой линии трубопровода.

При построении напорной линии нужно вертикалями выделить расчетные участки. Таких участков в данной задаче будет три. Далее в произвольно выбранном вертикальном масштабе откладывается от осевой линии величина найденного уровня жидкости в резервуаре H . Проводя по этому уровню горизонтальную линию, получаем линию исходного (первоначального) напора. От уровня жидкости в резервуаре по вертикали, отвечающей сечению при входе жидкости в трубопровод, откладывается в масштабе вниз отрезок, равный потере напора при входе жидкости в трубу (потеря напора в местном сопротивлении $h_{\text{вх}}$). На участке l_1 имеет место потеря напора по длине трубопровода h_{l_1} . Для получения точки, принадлежащей напорной линии в конце участка l_1 , нужно от линии полного напора после входа жидкости в трубу отложить по вертикали в конце участка l_1 вниз в масштабе отрезок, соответствующий потере напора на этом участке h_{l_1} . Затем от точки полного напора в конце участка l_1 откладывается в масштабе отрезок, соответствующий потере напора в местном сопротивлении, и так до конца трубопровода. Соединяя точки полного напора в каждом сечении, получим напорную линию.

Пьезометрическая линия показывает, как изменяется пьезометрический напор (удельная потенциальная энергия), по длине потока. Удельная потенциальная энергия меньше полной удельной энергии на величину удельной кинетической энергии $\frac{\alpha v^2}{2g}$. Поэтому, чтобы построить пьезометрическую линию, нужно вы-

числить на каждом участке величину $\frac{\alpha v^2}{2g}$ в начале и в конце каждого участка и соединяя полученные точки, строим пьезометрическую линию.

Графики напорной и пьезометрической линий будут построены правильно в том случае, если при их построении были выдержаны принятые вертикальный и горизонтальный масштабы, а также верно вычислены все потери напора и все скоростные напоры $\frac{\alpha v^2}{2g}$.

Для того чтобы проверить правильность построения напорной и пьезометрической линий, необходимо помнить следующее:

Напорная линия вниз по течению всегда убывает. Нигде и никогда напорная линия не может вниз по течению возрастать.

Поскольку потеря энергии потока на трение зависит от скорости движения жидкости, интенсивность потери напора (потеря напора на единицу длины или

гидравлический уклон) будет больше на том участке, где скорость больше. Следовательно, на участках с меньшими диаметрами и большими скоростями наклон напорной и пьезометрической линии будет больше.

В отличие от напорной пьезометрическая линия может вниз по течению как убывать, так и возрастать (при переходе с меньшего сечения на большее).

В пределах каждого участка пьезометрическая линия должна быть параллельна напорной, поскольку в пределах каждого участка постоянна величина $\frac{\alpha v^2}{2g}$.

На тех участках, где скорость больше, расстояние между напорной и пьезометрической линиями больше.

Как бы ни изменялась пьезометрическая линия по длине потока при выходе его в атмосферу (свободное истечение), она неизбежно должна приходить в центр тяжести выходного сечения. Это происходит потому, что пьезометрическая линия показывает изменение избыточного давления по длине трубопровода, которое в выходном сечении равно нулю, поскольку в выходном сечении абсолютное давление равно атмосферному.

После построения напорной и пьезометрической линий на графике показывают все потери напора и все скоростные напоры с указанием их численных значений. Примерный вид графика приведен на рис. 3.4.

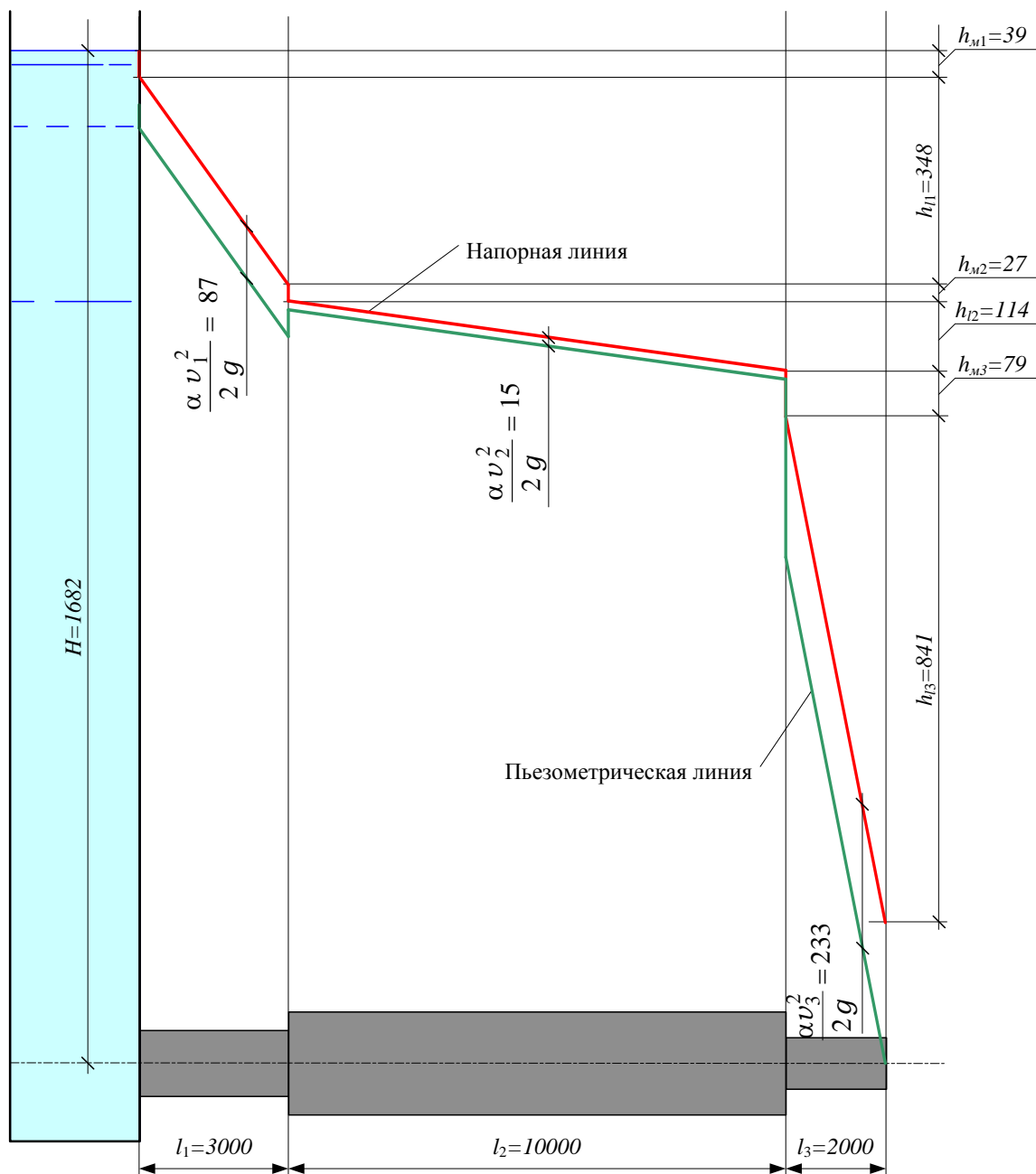


Рис. 3.4.

ЗАДАЧА 7

Назначить диаметр трубопровода D и определить необходимую высоту водонапорной башни H_6 в точке А (рис. 3.5) для обеспечения расчетной подачи воды с расходом Q потребителю в точке В по трубопроводу длиной l , при разности отметок земли в точках А и В, равной Z и минимальном свободном напоре в точ-

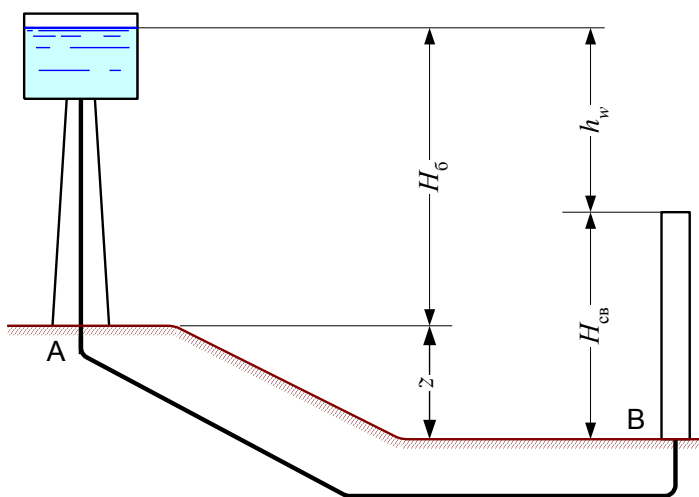


Рис. 3.5.

ке В равном $H_{св}$. Определить величину свободного напора при увеличении расхода на 20 %.

Примечание. Трубы чугунные, потери напора в местных сопротивлениях принять равными 10 % от потерь напора по длине.

Указания к решению задачи 7

1. Диаметр трубопровода назначается по предельным расходам, представленным в [ПРИЛОЖЕНИЕ 4](#)

2. Определяется скорость движения воды из [выше](#).

3. Вычисляются по [выше](#) потери напора на участке трубопровода h_w от точки А до точки В.

4. Необходимая высота водонапорной башни в соответствии с рис 3.5 равна, м

$$H_{б} = h_w + H_{св} - z.$$

5. Величина свободного напора в конечной точке сети при изменении расхода определяется по формуле, м

$$H_{св} = H_{б} + z - h'_w,$$

где h'_w – потери напора в сети при расходе $Q' = 1,2Q$, определяемые по [выше](#), м.

4. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ МАЛЫЕ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ

4.1. Истечение жидкости через малые отверстия в тонкой стенке

Малым отверстием считается такое отверстие в верхней и нижней точках, которого давления не отличаются более чем на 5 % от давления в центре отверстия. Это условие выполняется, когда вертикальный размер отверстия не превышает 0,1 величины глубины погружения центра отверстия под уровень жидкости.

Тонкой называется такая стенка, толщина которой не оказывает влияния на характер истечения из отверстия.

При истечении жидкости через отверстие линии тока перед отверстием и в плоскости отверстия не парал-

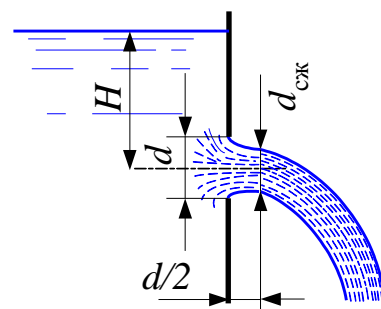


рис. 4.1

лельны (рис. 4.1). Наибольшую кривизну имеют линии тока на краях отверстия. Из-за действия сил инерции, возникающих при изменении направления движения частиц жидкости, происходит сжатие струи. Кривизна линий тока за отверстием уменьшается. На расстоянии примерно половине диаметра от отверстия линии тока становятся практически параллельны. Сечение струи расположенное в данном месте называется сжатым. Степень сжатия струи характеризуется коэффициентом сжатия струи

$$\varepsilon = \frac{\omega_{сж}}{\omega}, \quad (4.1)$$

где $\omega_{сж}$ – площадь живого сечения струи в сжатом сечении, м^2 ; ω – площадь отверстия, м^2 .

Скорость истечения жидкости через малое отверстие в тонкой стенке определяется по формуле, м/с

$$v = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (4.2)$$

где φ – коэффициент скорости; H – напор перед отверстием, м .

Коэффициент скорости учитывает сопротивление при истечении жидкости через отверстие

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}}, \quad (4.3)$$

Коэффициент скорости зависит от режима движения, вязкости жидкости и размеров и формы отверстия.

Расход жидкости равен, $\text{м}^3/\text{с}$

$$Q = \omega_{сж} v = \omega \varepsilon \varphi \sqrt{2gH} = \omega \mu \sqrt{2gH}, \quad (4.4)$$

где μ – коэффициент расхода, зависящий от вида сжатия, размеров формы отверстия и напора.

4.2. Истечение жидкости через насадки

Насадком называется короткий трубопровод, работающий на выходе полным сечением, присоединяемый к отверстию в тонкой стенке, для изменения характеристик истечения по сравнению с истечением через отверстие. Работа полным сечением на выходе обеспечивается при длине трубы более 3,5–4 диаметров.

При входе в насадок происходит искривление линий тока, образуется сжатое сечения, затем поток расширяется и заполняет все поперечное сечение насадка. На участке сжатия струи поток можно разделить на транзитную струю и водоворотную область. В сжатом сечении скорость больше чем на выходе из насадка. В

выходном сечении давление равно атмосферному, поэтому в сжатом сечении создается вакуум.

При равных площадях и напорах пропускная способность насадка оказывается выше, чем отверстия.

При увеличении длины насадка возрастают потери энергии, уменьшается величина вакуума, поэтому пропускная способность насадка уменьшается. При длине насадка больше 45–55 диаметров давление в сжатом сечении становится равным или несколько больше атмосферного, следовательно, пропускная способность трубопровода равна или меньше пропускной способности отверстия.

Насадки по форме разделяются на: цилиндрические (внешние рис. 4.2 а и внутренние рис. 4.2 б), конические (расходящиеся рис. 4.2 в и сходящиеся рис. 4.2 г) и коноидальные рис. 4.2 д.

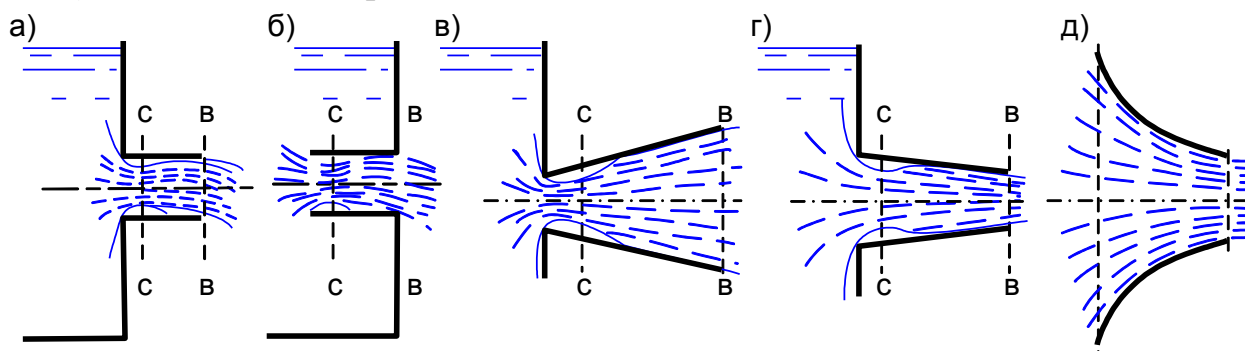


Рис. 4.2

Формулы для определения скорости истечения и расхода имеют такой же вид, как при истечении из отверстия отличаются только величины коэффициентов скорости и расхода. Значения коэффициентов сжатия струи, скорости и расхода для разных видов насадков приведены в [ПРИЛОЖЕНИЕ 6](#).

Площадь выходного сечения у конических расходящихся насадков больше чем у цилиндрических, поэтому величина вакуума в сжатом сечении у конических расходящихся насадков больше. Следовательно, пропускная способность конических расходящихся насадков выше, чем пропускная способность внешних цилиндрических. Величина вакуума увеличивается с увеличением угла конусности. Однако существует предельное значение угла конусности превышение, которого приводит к срыву вакуума. Оптимальное значение угла конусности составляет $5-7^\circ$. Струя на выходе из насадка не имеет сжатия, поэтому $\varepsilon = 1$ и, следовательно, $\mu = \varphi$.

У конических сходящихся насадков после сжатого сечения струя расширяется, достигает стенок насадка и при выходе из насадка несколько сжимается. Коэффициенты скорости и расхода достигают максимального значения при угле конусности $13^\circ 14'$ при этом площадь выходного сечения равна площади сжатого сечения. Вакуум в конических сходящихся насадках не возникает. Область применения данных насадков – большая кинетическая энергия струи на выходе из насадка.

Коноидальные насадки имеют очертание струй истекающих из отверстий.

ЗАДАЧА 8

Определить скорость и расход из круглого отверстия диаметром d и установить, как они изменятся, если к отверстию присоединить цилиндрический насадок длиной $4d$, конический расходящийся насадок с углом конусности 6° и конический сходящийся насадок с углом конусности $13^\circ 14'$. Напор в центре тяжести отверстия H . Давление на свободной поверхности жидкости равно атмосферному.

Указания к решению задачи 8

1. Скорость истечения и расход для круглого отверстия определяется соответственно по [выше](#) и [выше](#). Значения коэффициентов скорости и расхода принимаются по [ПРИЛОЖЕНИЕ 6](#).

2. Определяется диаметр выходного отверстия для конического расходящегося насадка $D = d + 2l \operatorname{tg} 3^\circ$. Находится площадь выходного отверстия для конического расходящегося насадка.

3. По [выше](#) и [выше](#) вычисляются соответственно скорости и расходы для внешнего цилиндрического, конического расходящегося и конического сходящегося насадков. Значения коэффициентов скорости и расхода насадков определяются по [ПРИЛОЖЕНИЕ 6](#).

4. Проводится сравнение результатов расчетов.

5. РАВНОМЕРНОЕ БЕЗНАПОРНОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ

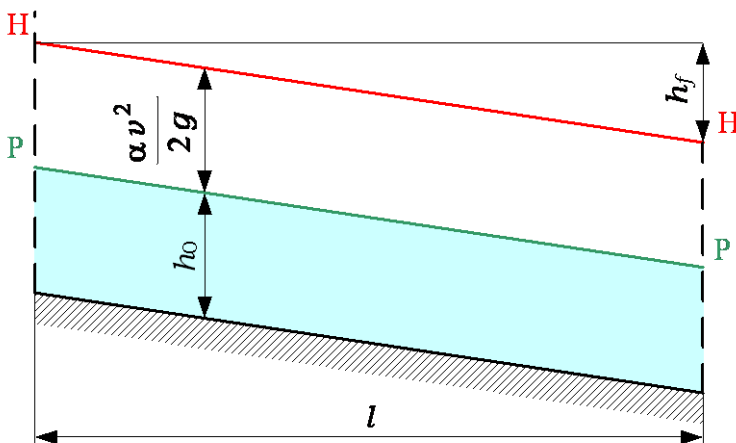


Рис. 5.1.

Равномерным называется такое движение, когда площадь живого сечения ω , средняя скорость v , а также эпюра распределения скорости по живому сечению не меняются вдоль потока.

При этом движении глубина потока по его длине не меняется и называется *нормальной глубиной* h_0 .

При равномерном движении напорная линия Н–Н, линия свободной поверхности она же пьезометрическая линия Р–Р и линия дна канала параллельны (рис. 5.1). Следовательно, гидравлический уклон равен пьезометрическому уклону и равен уклону дна канала i .

Так как величина уклона обычно невелика, считают, что поперечные сечения вертикальны.

Расход воды при расчете равномерного безнапорного движения воды в каналах определяется по формуле

$$Q = v \omega. \quad (5.1)$$

Средняя скорость движения воды вычисляется по формуле Шези

$$v = C \sqrt{Ri}, \quad (5.2)$$

где C – коэффициент Шези, $\text{м}^{0.5}/\text{с}$; R – гидравлический радиус, м.

Поперечное сечение каналов может иметь различные формы (рис. 5.2), однако наибольшее распространение получили каналы трапецеидального сечения. Здесь: b – ширина канала по дну, м; h – глубина воды, м; m – коэффициент откоса, равный $\text{ctg } \varphi$; B – ширина потока по верху, м; ω – площадь живого сечения, м^2 ; χ – смоченный периметр, м.

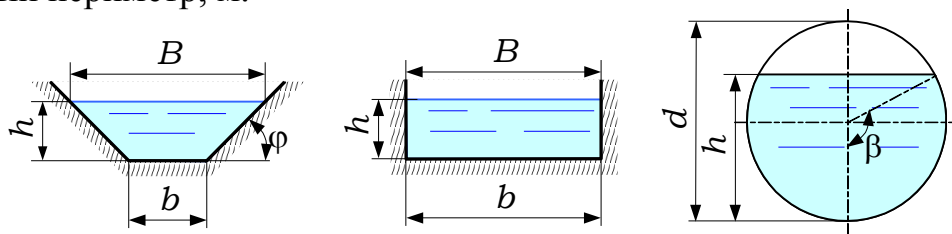


Рис. 5.2.

Формулы для определения ω и χ .

Трапецеидальное сечение:

$$\omega = (b + mh)h; \quad (5.3)$$

$$\chi = b + 2h\sqrt{m^2 + 1}; \quad (5.4)$$

$$B = b + 2mh. \quad (5.5)$$

Прямоугольное сечение, $m = 0$:

$$\omega = bh; \quad (5.6)$$

$$\chi = b + 2h. \quad (5.7)$$

Круглое сечение:

$$a = 1 - 2\frac{h}{d}; \quad (5.8)$$

$$\beta = \arccos(a); \quad (5.9)$$

$$\omega = \frac{d^2}{4} (\beta - a \sin \beta); \quad (5.10)$$

$$\chi = \beta d. \quad (5.11)$$

Гидравлический радиус вычисляется по [выше](#).

Коэффициент Шези вычисляется по формуле Маннинга, $m^{0.5}/c$

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}. \quad (5.12)$$

где n – коэффициент шероховатости стенок русла, принимаемый по [ПРИЛОЖЕНИЕ 7](#).

ЗАДАЧА 9.

Определить нормальную глубину и среднюю скорость движения воды в канале заданного поперечного сечения (рис. 5.2) для заданных расхода воды Q , геометрических размеров русла канала, уклона дна канала i и материала стенок канала.

Указания к решению задачи 9

Основной зависимостью при расчете каналов при равномерном движении в них воды является [выше](#). Величины площади живого сечения ω , коэффициента Шези C и гидравлического радиуса R выражаются достаточно сложными зависимостями от глубины воды в канале. Поэтому непосредственно из формулы Шези найти глубину воды невозможно. Данную задачу можно решить подбором, численно или графически. В контрольной работе предлагается графическое решение.

1. Для построения кривой связи $Q = f(h)$ необходимо задаться рядом произвольных значений глубин (не менее 5) и в табличной форме определить соответствующие им расходы (табл. 5.1).

Таблица 5.1.

$h, \text{ м}$	h_1	h_2	\dots	h_n
$\omega, \text{ м}^2$				
$\chi, \text{ м}$				
$R = \frac{\omega}{\chi}, \text{ м}$				

$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}, \text{ м}^{0,5}/\text{с}$				
$v = C \sqrt{Ri}, \text{ м/с}$				
$Q = \omega v, \text{ м}^3/\text{с}$				

2. По данным табл. 5.1 строится график рис. 5.3. По заданному расходу Q по графику определяется глубина h_0 .

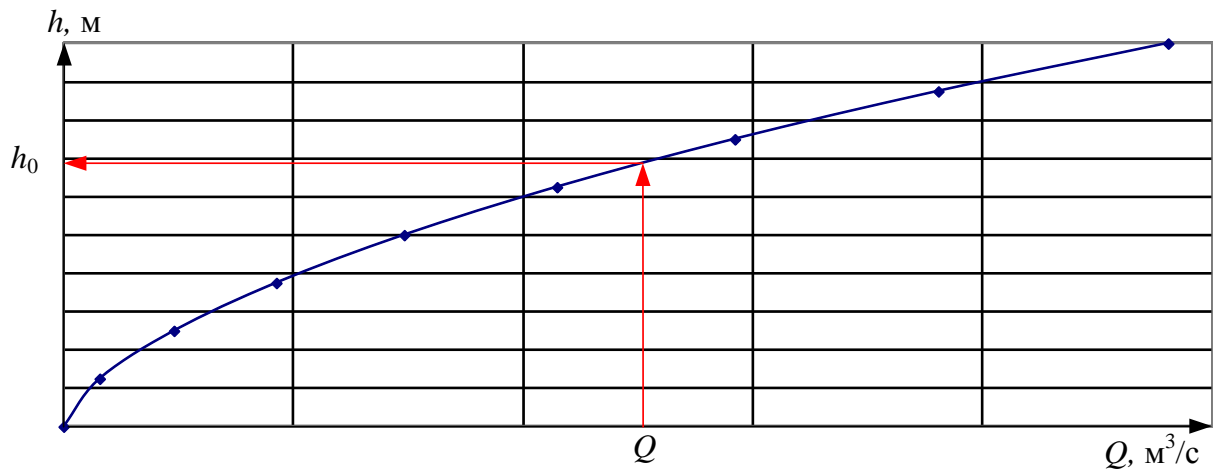


Рис. 5.3.

3. Подставив в табл. 5.1 найденную нормальную глубину вычисляется соответствующая ей средняя скорость потока.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Значения кинематического коэффициента вязкости воды при различной температуре.

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40
$\nu, \text{cm}^2/\text{c}$	0,0178	0,0131	0,0101	0,0090	0,0066
$t, ^\circ\text{C}$	50	60	70	80	90
$\nu, \text{cm}^2/\text{c}$	0,0058	0,0048	0,0040	0,0036	0,0030

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Удельные сопротивления $\text{с}^2/\text{м}^6$ и расходные характеристики, $\text{м}^3/\text{с}$, для бывших в эксплуатации водопроводных труб при скорости $\nu \geq 1,2$

Диаметр условного прохода	Трубы	
	Стальные	Чугунные
	A	A
100	173	312
125	76,4	96,7
150	30,65	37,1
175	20,8	—
200	6,96	8,09
250	2,19	2,53
300	0,85	0,95
350	0,373	0,437
400	0,191	0,219

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Значение поправочного коэффициента K_1 в зависимости от средней скорости движения потока ν

$\nu, \text{м/с}$	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
K_1	1,41	1,33	1,28	1,24	1,20	1,175	1,15	1,13	1,115
$\nu, \text{м/с}$	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	1,00	1,10	1,20
K_1	1,10	1,085	1,07	1,06	1,05	1,04	1,03	1,015	1,00

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Предельные расходы Q , л/с и скорости v , м/с в водопроводных трубах

Диаметр условного прохода	Трубы			
	Стальные		Чугунные	
	Q	v	Q	v
100	11,7	1,15	9,4	1,15
125	16,6	1,19	15,0	1,18
150	21,8	1,12	25,3	1,40
175	29,2	1,30	—	—
200	46,0	1,34	45,8	1,42
250	71,0	1,34	73,5	1,46
300	103	1,35	108	1,48
350	140	1,35	149	1,53
400	184	1,36	197	1,56

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Значение коэффициента $\zeta_{вс}$ при внезапном сужении трубопровода

$n = \frac{\omega_2}{\omega_1}$	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\zeta_{вс}$	0,41	0,4	0,38	0,36	0,34	0,3	0,27	0,2	0,16	0,1

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Значения коэффициентов сжатия струи ε , скорости φ и расхода μ для малого круглого отверстия в тонкой стенке и различных видов насадков

Тип насадка	ε	φ	μ
Круглое отверстие	0,64	0,970	0,620
Внешний цилиндрический насадок	1,00	0,820	0,820
Внутренний цилиндрический насадок	1,00	0,707	0,707
Конический расходящийся насадок при $\theta = 5 - 7^\circ$ (для выходного сечения)	1,00	0,500	0,500
Конический сходящийся насадок при $\theta = 13^\circ 24'$	0,98	0,960	0,940
Коноидальный насадок	1,00	0,980	0,980

Коэффициент шероховатости русел

Материал стенок русла	Коэффициент шероховатости n
сталь	0,012
чугун	0,013
бетон	0,013
нескальный грунт	0,025
скальный грунт	0,040

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лапшев Н.Н. Основы гидравлики и теплотехники: Учебник для вузов / Н.Н. Лапшев, Леонтьева Ю.Н. – М.: Академия, 2012. – 400 с.
2. Чугаев Р.Р. Гидравлика: Учебник для вузов. 5-е изд., репринтное. – М.: ООО «БАСТЕТ», 2008. – 672 с.: ил.
3. Примеры расчетов по гидравлике: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Н. М. Константинова. – М.: Стойиздат, 1976. – 255 с.