Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В.Плеханова
(технический университет)

Б.С.МАХОВИКОВ, В.И.МЕДВЕДКОВ, В.В.ШОРНИКОВ

СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО ГИДРАВЛИКЕ И ГИДРОПРИВОДУ

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов
Российской Федерации по образованию в области горного дела
в качестве учебного пособия для студентов высших
учебных заведений, обучающихся по специальности
«Горные машины и оборудование» направления
«Технологические машины и оборудование»*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2004

УДК 622.223:621.22(075.80)
ББК 30.123.я7
М365

Приведены основные понятия гидравлики и гидропривода, расчетные зависимости, примеры решения задач и краткие справочные данные. Задачи могут быть использованы при проведении практических занятий, контрольных работ, зачетов, экзаменов, при составлении домашних заданий и расчетно-графических работ, для иллюстрации лекционного материала. Приведены задачи и расчетные задания по гидравлике шахтных водопроводных сетей и гидроприводу горных машин.

Сборник предназначен для студентов горных специальностей, изучающих курсы «Гидромеханика», «Гидравлика», «Гидравлика и гидропривод» на дневных, вечерних и заочных отделениях вузов, а также может быть использован инженерными работниками соответствующих проектных организаций.

Рецензенты: канд. техн. наук В.И.Кибирев (ЗАО «Механобр инжиниринг»); канд. техн. наук В.А.Зимницкий («Энергомаш (ЮК)»).

Маховиков Б.С.
М365. СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ГИДРАВЛИКЕ И ГИДРОПРИВОДУ: Учеб. пособие / Б.С.Маховиков, В.И.Медведков, В.В.Шорников. Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). СПб, 2004. 153 с.
ISBN 5-94211-109-X

УДК 622.223:621.22(075.80)
ББК 30.123.я7

ISBN 5-94211-109-X

ВВЕДЕНИЕ

Сборник задач составлен в соответствии с учебными программами курсов «Гидромеханика», «Гидравлика», «Гидравлика и гидропривод» для студентов, изучающих горные специальности 170100 «Горные машины и оборудование», 090500 «Открытые горные работы», 090201 «Подземная разработка пластовых месторождений», 090202 «Подземная разработка рудных месторождений», 090400 – «Шахтное и подземное строительство» и др.

Сборник задач содержит краткие теоретические данные, формулы, справочные таблицы, иллюстрации, примеры и задачи. Три первые раздела носят общетехнический характер. Четвертый раздел непосредственно связан с вопросами горного дела; приведены задачи по определению параметров струеформирующих устройств и струй для гидравлического разрушения угля, для тушения подземных пожаров, для производства гидровскрышных работ. В пятом разделе рассматриваются вопросы водоснабжения забоев гидрошахт и шахтного водоотлива, а также анализируется расчетно-графическая работа по расчету параметров распределительной трубопроводной сети. Шестой раздел посвящен фильтрации жидкости – одному из важных процессов горного дела. В седьмом разделе предлагается ряд задач, связанных с приводом проходческих и выемочных комбайнов, с анализом различных схем циркуляции жидкости в системах гидропривода горных машин, и формулируются задания для расчетно-графических работ по расчету и выбору оборудования гидропривода для конкретных горных машин.

Каждая задача снабжена ответом; следует иметь в виду, что ответы связаны либо с единственно возможным и широко известным способом решения, либо в задаче даются наводящие рекомендации, которые следует выполнять для получения заданного ответа, либо в теоретической части указаны необходимые рекомендации. Большинство задач содержат данные в единицах Международной системы (СИ), однако, в некоторых задачах использованы ранее принятые размерности, что должно способствовать, по мнению авторов, развитию навыков перевода единиц из одной системы в другую.

В сборнике в переработанном виде использованы задачи из «Задачника по гидравлике и гидроприводу для студентов горных специальностей» [3].

РАЗДЕЛ 1

СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

Плотность жидкости – параметр, характеризующий количество ее массы m в единице объема V,

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ кг/м}^3. \tag{1.1}$$

Плотность смеси разных веществ определяется выражением

$$\rho_{\text{см}} = \frac{m_1 + m_2}{V_1 + V_2} = \frac{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2}{V_1 + V_2}. \tag{1.2}$$

В табл.1.1 приведены значения плотности некоторых жидкостей и газов.

Таблица 1.1

Жидкость	Температура, °C	Плотность, кг/м^3	Жидкость	Температура, °C	Плотность, кг/м^3
Метан	20	0,668	Мазут	-	933-998
Воздух	20	1,186	Минеральные масла	-	850-920
Воздух	0	1,293			
Керосин	15	806-831	Вода	4	1000
Спирт	20	790	Глицерин	20	1260
Нефть	20	850-950	Ртуть	20	13546

Удельный вес – сила тяжести (вес) вещества в единице объема:

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g, \text{ Н/м}^3. \tag{1.3}$$

Сжимаемость – свойство жидкости изменять свой объем V при изменении давления p. Сжимаемость характеризуется *коэффициентом сжимаемости* α_p (м^2/Н) или *модулем упругости жидкости* $E_ж$ (Н/м^2 = Па) (табл.1.2),

$$E_ж = 1/\alpha_p. \tag{1.4}$$

При увеличении давления на величину Δp начальный объем жидкости V уменьшится на величину ΔV:

$$\Delta V = \alpha_p V \Delta p = \frac{1}{E_ж} V \Delta p. \tag{1.5}$$

Плотность этой жидкости изменится согласно зависимости

$$\rho_p \approx \rho_о (1 + \alpha_p \Delta p), \tag{1.6}$$

где $\rho_о$ – начальная плотность жидкости при начальном давлении; ρ_p – плотность при конечном давлении.

Таблица 1.2

Жидкость	Среднее значение $E_ж$, МПа	Жидкость	Среднее значение $E_ж$, МПа
Спирт	1280	Мин. масла	1670
Керосин	1300	Вода	2050
Нефть	1325	Глицерин	4000

Тепловое расширение – свойство жидкости изменять свой объем при изменении температуры. Тепловое расширение характеризуется *коэффициентом объемного расширения* α_t. При увеличении температуры на величину Δt начальный объем жидкости V увеличится:

$$\Delta V = \alpha_t V \Delta t, \tag{1.7}$$

а плотность изменится в соответствии с формулой

$$\rho_t \approx \rho_о (1 - \alpha_t \Delta t). \tag{1.8}$$

Среднее значение α_t для некоторых жидкостей при t = 20 °С дано в табл.1.3.

Таблица 1.3

Жидкость	α_t, К$^{-1}$	Жидкость	α_t, К$^{-1}$
Вода	$(1{,}5\text{-}2)\cdot 10^{-4}$	Керосин	$9{,}6\cdot 10^{-4}$
Глицерин	$4{,}9\cdot 10^{-4}$	Спирт	$11\cdot 10^{-4}$
Минеральные масла	$7\cdot 10^{-4}$		

Величина α_t зависит от температуры и давления. Значения коэффициента α_t для воды при p = 0,1 МПа приведены в табл.1.4.

Таблица 1.4

T, °С	1-10	10-20	40-50	60-70	90-100
α_t, К$^{-1}$	$0{,}14\cdot 10^{-4}$	$1{,}50\cdot 10^{-4}$	$4{,}22\cdot 10^{-4}$	$5{,}56\cdot 10^{-4}$	$7{,}19\cdot 10^{-4}$

Совместное влияние давления и температуры на плотность жидкости можно примерно оценить зависимостью

$$\rho_ж = \rho_о(1 - \alpha_t \Delta t + \alpha_p \Delta p). \quad (1.9)$$

Вязкость – свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигу ее слоев или их относительному смещению. Вязкость проявляется при движении жидкости, при этом возникают касательные напряжения τ, которые пропорциональны (коэффициент пропорциональности μ) градиенту скорости $\frac{du}{dn}$, т.е.

$$\tau = \pm\mu \frac{du}{dn}. \quad (1.10)$$

Коэффициент пропорциональности есть *динамический коэффициент вязкости*

$$\mu = \rho\nu, \ \text{Па}\cdot\text{с}, \quad (1.11)$$

где ν – *кинематический коэффициент вязкости*, м^2/с.

Иногда встречаются внесистемные единицы: для μ – пуаз (П), для ν – стокс (Ст). Соотношение между внесистемными единицами и единицами СИ:

$$1\,\text{Ст} = 10^{-4}\,\text{м}^2/\text{с}; \quad 1\,\text{П} = 0{,}1\,\text{Па}\cdot\text{с}.$$

В табл.1.5 приведены значения ν для некоторых жидкостей.

Таблица 1.5

Жидкость	Температура, °С	$\nu\cdot10^6$, м²/с	Жидкость	Температура, °С	$\nu\cdot10^6$, м²/с
Бензин	15	0,60	Масла минеральные (гидропривод)	50	9,6-55
Вода	20	1,006			
Спирт этиловый	20	1,51	Нефть	18	25-140
Керосин	15-20	2-2,5	Мазут топочный	80	44-118
Воздух	15	14,5	Глицерин	20	870

Кинематический коэффициент вязкости для воды в зависимости от температуры можно определить по эмпирической формуле

$$\nu = \frac{1{,}775\cdot10^{-6}}{1 + 3{,}37\cdot10^{-2}t + 2{,}21\cdot10^{-4}t^2},\ \text{м}^2/\text{с}. \qquad (1.12)$$

В табл.1.6 приведены значения ν воздуха и керосина для разных температур

Таблица 1.6

Жидкость	$\nu\cdot10^6$, м²/с			
	t = 0 °С	15 °С	18 °С	20 °С
Воздух	13	14,5	-	15
Керосин	-	-	2,5	2,2

Вязкость также может быть представлена условными единицами (ВУ – вязкость условная) или градусами Энглера (°Е)

$$°\mathrm{E} = t/t_{\mathrm{o}}, \tag{1.13}$$

где $t_{\mathrm{o}} = 52$ с – водное число, соответствующее времени истечения 200 см^3 дистиллированной воды при 20 °С; t – время истечения из вискозиметра Энглера того же объема жидкости при заданной температуре.

Через градус Энглера (или ВУ) коэффициент ν выражается следующим образом:

$$\nu = \left(0{,}0731\text{ВУ} - \frac{0{,}0631}{\text{ВУ}}\right)10^{-4},\ \text{м}^2/\text{с}. \tag{1.14}$$

Сведения о коэффициентах ν и μ также содержатся в справочной литературе [1].

В ряде случаев может быть задан закон изменения местной скорости в рассматриваемом сечении плоского потока, например, в виде $u = an - bn^2$, где u и n – величины, входящие в градиент скорости $\frac{du}{dn}$. Определять заданные параметры следует с использованием соответствующей производной при заданных граничных параметрах.

В других ситуациях возникает необходимость определять силы трения или момент сил трения при вращении одной детали относительно другой, если в кольцевом зазоре между ними находится какая-либо жидкость. Здесь сила трения определяется по формуле

$$T = \frac{\pi D b \mu u_{\mathrm{o}}}{s},\ \text{Н}, \tag{1.15}$$

где D и b – соответственно диаметр и длина цапфы; s – зазор между перемещающимися поверхностями; u_{o} – скорость движущейся поверхности.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1.1. Найти отношение удельных весов воды у поверхности Земли (γ_1) и на такой высоте от поверхности, где ускорение свободного падения $g_2 = 4$ м/с^2 (γ_2), если у поверхности плотность воды $\rho = 1000$ кг/м^3.

Решение. У поверхности Земли $g_1 = 9,81$ м/с^2. Искомое соотношение согласно выражению (1.3)

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{\rho_1 g_1}{\rho_2 g_2} = \frac{1000 \cdot 9,81}{1000 \cdot 4} = 2,45.$$

Ответ: $\gamma_1 / \gamma_2 = 2,45.$

Пример 1.2. При напорном течении горячего мазута по трубе касательное напряжение на ее внутренней поверхности составляет $\tau = 2$ Па. Найти значение кинематического коэффициента вязкости мазута, если скорость в поперечном сечении трубы изменяется согласно уравнению $u = 40y - 400y^2$.

Решение. Согласно формуле (1.10) $\tau = \mu \dfrac{du}{dn}$, а с учетом формулы (1.11) $\nu = \tau / \left(\rho \dfrac{du}{dn}\right)$; $y = n$. Примем плотность мазута $\rho = 933$ кг/м^3 (см. табл.1.1). Производная $\dfrac{du}{dy} = 40 - 800y$. На стенке трубы, где действует заданное напряжение τ, $y = 0$; при этом $\dfrac{du}{dy} = 40$ и искомый коэффициент $\nu = \dfrac{2}{933 \cdot 40} = 53,5 \cdot 10^{-6}$ м^2/с. Сравнение с данными табл.1.5 подтверждает правильность найденного решения.

Ответ: $\nu = 53,5 \cdot 10^{-6}$ м^2/с.

Пример 1.3. При гидроопрессовке баллона он был заполнен водой при давлении $p_1 = 6$ МПа. В результате утечки части воды через неплотности давление в баллоне снизилось вдвое.

Пренебрегая деформацией стенок баллона, определить объем воды ΔV, вытекшей за время опрессовки, если диаметр баллона $D = 350$ мм, а его высота $H = 1200$ мм.

Решение. Согласно формуле (1.5) $\Delta V = \frac{1}{E_ж} V \Delta p$. По табл.1.2 для воды $E_ж = 2050$ МПа. Изменение давления за время опрессовки $\Delta p = p_1 - p_2 = p_1 - 0{,}5 p_1 = 0{,}5 p_1 = 3$ МПа. Объем воды в баллоне $V = \frac{\pi}{4} D^2 H = \frac{\pi}{4} 0{,}35^2 \cdot 1{,}2 = 0{,}115\,м^3$.

Искомая утечка:

$$\Delta V = \frac{1}{2050} \cdot 0{,}115 \cdot 3 = 0{,}168 \cdot 10^{-3}\,м^3 = 0{,}168\,л.$$

Ответ: $\Delta V = 0{,}168$ л.

ЗАДАЧИ

Задача 1.1. Определить, во сколько раз изменится плотность воздуха, если его нагреть от 0 до 80 °С при постоянном давлении.

Ответ: в 1,293 раза.

Задача 1.2. В резервуар, содержащий 125 м^3 нефти плотностью 760 кг/м^3, закачано 224 м^3 нефти плотностью 848 кг/м^3. Определить плотность смеси.

Ответ: $\rho_{см} = 816{,}5$ кг/м^3.

Задача 1.3. Определить объем, занимаемый нефтью весом 1,25 МН, если ее плотность равна 850 кг/м^3.

Ответ: $V = 149{,}9$ м^3.

Задача 1.4. В резервуар залито 15 м^3 нефти плотностью 800 кг/м^3. Сколько необходимо долить нефти плотностью 824 кг/м^3, чтобы плотность смеси стала равной 814 кг/м^3?

Ответ: $V_2 = 21$ м^3.

Задача 1.5. В резервуар залито 20 м^3 нефти плотностью 850 кг/м^3 и 25 м^3 нефти плотностью 840 кг/м^3. Определить плотность смеси.

Ответ: $\rho_{см}$ = 844,4 кг/м^3.

Задача 1.6. Определить удельный вес жидкости при ускорении силы тяжести 9,81 м/с^2 и 2 м/с^2, если 0,8 л этой жидкости уравновешиваются гирей массой 1,5 кг.

Ответ: γ_1 = 18394 Н/м^3; γ_2 = 3750 Н/м^3.

Задача 1.7. Определить ориентировочно вид жидкости, если 11,9 л этой жидкости уравновешиваются гирей массой 15 кг на уровне поверхности моря.

Ответ: жидкость – глицерин.

Задача 1.8. Сосуд объемом 2 м^3 заполнен водой. На сколько уменьшится и чему станет равным объем воды при увеличении давления на $2 \cdot 10^7$ Па?

Ответ: ΔV = 0,0195 м^3; V_2 = 1,9804 м^3.

Задача 1.9. При давлении p_1 = 0,1 МПа объем воды в баллоне составляет V. На сколько процентов сократится этот объем при увеличении давления в 50 раз?

Ответ: ΔV составляет 0,24 % от V.

Задача 1.10. Баллон объемом 36 дм^3 заполнен нефтью и плотно закрыт при давлении $1 \cdot 10^5$ Па. Какое количество нефти необходимо закачать в баллон дополнительно, чтобы давление в нем повысилось в 25 раз? Деформацией стенок баллона пренебречь.

Ответ: ΔV = 65 см^3.

Задача 1.11. При испытании резервуара гидравлическим способом он был заполнен водой при давлении $50 \cdot 10^5$ Па. В результате утечки части воды через неплотности давление в резервуаре понизилось до $11{,}5 \cdot 10^5$ Па. Пренебрегая деформацией стенок резервуара, определить объем воды, вытекшей за время испытания. Объем резервуара 20 м^3.

Ответ: ΔV = 0,037 м^3.

Задача 1.12. Определить давление, требующееся для сжатия жидкости с объемным модулем упругости $E_ж$ = 2000 МПа в 1,5 раза.

Ответ: p = 666 МПа.

Задача 1.13. Определить, во сколько раз сжимается жидкость с объемным модулем упругости $E_ж$ = 2100 МПа под давлением p = 200 МПа.

Ответ: в 1,11 раза.

Задача 1 14. Стальной горизонтальный трубопровод длиной L = 15 км, диаметром D = 0,6 м опрессовывают водой с давлением p = 0,6 МПа. Определить объем воды V, закачиваемый в трубопровод в процессе опрессовки. Упругостью стенок трубопровода пренебречь.

Ответ: V = 4240,24 м^3.

Задач 1.15. Определить, какой вес должен иметь батискаф, чтобы достигнуть глубины H = 1400 м при диаметре корпуса D = 3 м и длине L = 6 м. Плотность морской воды на поверхности составляет 1030 кг/м^3, температура 20 °С. Температура воды на глубине 1400 м равна 4 °С. Коэффициент сжимаемости воды $0.49 \cdot 10^{-9}$ Па$^{-1}$, коэффициент теплового объемного расширения воды $1 \cdot 10^{-4}$ К$^{-1}$.

Ответ: G > 431975 *Н*.

Задача 1.16. 23500 кг бензина при температуре 276 К занимают объем 33,25 м^3. Какой объем будет занимать бензин при температуре 290 К, если давление не изменится? Коэффициент температурного расширения бензина принять α_t = 0,00065 К$^{-1}$.

Ответ: 33,56 м^3.

Задача 1.17. Стальной баллон заполнен водой и плотно закрыт при t_1 = 20 °С и давлении p_1 = 0,1 МПа. Определить давление p_2 в баллоне при t_2 = 60 °С. При t = 20 °С плотность воды

ρ_{20} = 998,23 кг/м^3, а при t = 60 °С ρ_{60} = 983,24 кг/м^3. Модуль упругости воды принять равным 2050 МПа.

Ответ: p_2 = 30,89 МПа.

Задача 1.18. Определить динамический коэффициент вязкости жидкости и ее вид (ориентировочно), если при объеме V = 200 мл и весе G = 1,8 *Н* она вытекает из вискозиметра Энглера при водном числе $t_о$ = 52 с за время t = 208 с.

Ответ: μ = 0,0257 Па·с; жидкость – минеральное масло.

Задача 1.19. Чему равен динамический коэффициент вязкости мазута, если его плотность 933 кг/м^3, а вязкость составляет 8 °Е?

Ответ: $\mu = 5{,}38 \cdot 10^{-2}$ Па·с.

Задача 1.20. Каково будет касательное напряжение у внутренней стенки топливного трубопровода при перекачивании топлива с вязкостью 10 °Е и плотностью ρ = 932 кг/м^3, если градиент скорости равен 4?

Ответ: τ = 0,27 Па.

Задача 1.21. Определить касательное напряжение на поверхности движущегося судна, если изменение скорости воды u по нормали к этой поверхности выражается уравнением $u = 516y - 13400y^2$, справедливым при значениях $y < 1{,}93 \cdot 10^{-2}$ м; температура воды равна 15 °С.

Ответ: τ = 0,58 Па.

Задача 1.22. Какова сила трения на внутренней стенке топливного трубопровода диаметром D = 80 мм и длиной L = 10 м, если скорость движения топлива по сечению трубопровода изменяется по закону $u = 25y - 312y^2$ (где y – расстояние от внутренней поверхности трубопровода, которое изменяется от 0 до $0{,}5D$)? Вязкость топлива составляет 9 °Е, плотность топлива ρ = 920 кг/м^3. Чему равна максимальная скорость движения топлива в трубопроводе?

Ответ: T = 3,76 *Н*; u_{max} = 0,5 м/с.

Задача 1.23. Определить силу T поверхностного трения тонкой пластины длиной L = 3 м, шириной b = 1 м, обтекаемой с двух сторон водой при температуре t = 15 °C, если скорость воды вблизи поверхности пластины в направлении нормали к ней изменяется по уравнению $u = 200y - 2500y^2$ (значения y изменяются от 0 до 0,04 м).

Ответ: T = 1,37 Н.

Задача 1.24. Плотность нефти при температуре t = 280 К равна 850 кг/м^3. Условная вязкость ее при температуре 295 К равна 6,4 °Е. Определить динамическую вязкость нефти при температуре 295 К, если коэффициент температурного расширения $\alpha_t = 0{,}72 \cdot 10^{-3}$ К$^{-1}$.

Ответ: μ = 0,0385 Па·с.

Задача 1.25. При определении вискозиметром условной вязкости дизельного масла ДП-II при температуре 100 °С время истечения 200 см^3 масла составило 1 мин 35,5 с. Водное число вискозиметра 50,3 с. Определить коэффициент кинематической вязкости масла.

Ответ: $\nu = 10{,}56 \cdot 10^{-6}$ м^2/с.

Задача 1.26. Определить кинематический коэффициент вязкости минерального масла, если его удельный вес γ = 8500 Н/м^3, а динамический коэффициент вязкости μ = 0,0986 Па·с.

Ответ: $\nu = 114 \cdot 10^{-6}$ м^2/с.

Задача 1.27. Найти динамический коэффициент вязкости жидкости в зазоре s = 5 мм между двумя цилиндрами длиной L = 90 см, средним диаметром $D_{ср}$ = 40 см при числе оборотов внутреннего цилиндра n = 50 об/мин и силе, удерживающей наружный цилиндр T = 3 Н.

Ответ: μ = 0,0127 Па·с.

РАЗДЕЛ 2

ГИДРОСТАТИКА

Гидростатическое давление p – есть напряжение сжатия, возникающее от действия внешних сил F,

$$p = \frac{F}{S}, \quad \text{Па} = \text{Н/м}^2, \tag{2.1}$$

где S – площадь рассматриваемой поверхности, м^2.

Единицы измерения гидростатического давления: паскаль (Па), атмосфера (ат), килограмм-сила на сантиметр квадратный (кгс/см^2), метры столба жидкости (м ст. ж.); последняя единица соответствует понятию «напор», который выражается через давление

$$H = \frac{p}{\rho g}. \tag{2.2}$$

Соотношение между различными единицами давления:

1 ат = 1 кгс/см^2 = 10 м вод. ст. = 736 мм рт. ст. = 98100 Па = = 98,1 кПа = 0,0981 МПа.

Согласно *основному уравнению гидростатики* давление в рассматриваемой точке жидкости (точка A на рис.2.1, *а*) есть алгебраическая сумма внешнего давления на жидкость $(\pm p_0)$ и давления от столба жидкости $(\pm H)$ над (или под) рассматриваемой точкой:

$$p_A = p_0 + \rho g H. \tag{2.3}$$

Различают: атмосферное давление $p_\text{а}$ $(p_\text{а} = 98100\ \text{Па})$, абсолютное давление $p_\text{абс}$, измеренное от абсолютного нуля; атмосферное давление абсолютное; избыточное положительное (кратко избыточное) давление или манометрическое $p_\text{и}$ – избыток над атмосферным давлением; избыточное отрицательное давление или вакуумметрическое $p_\text{вак} = -p_\text{и}$ – недостаток до атмосферного давления.

Абсолютное давление всегда положительное, а вакуумметрическое не может быть больше атмосферного.

Внешнее давление p_0 может быть атмосферным, т.е. $p_0 = p_а$, и может отличаться от атмосферного.

Внешнее давление p_0 на жидкость может быть создано компрессором ($+p_и$) или вакуум-насосом ($-p_и$), а также силовым поршнем (рис.2.1, *б*).

Внешнее давление на жидкость p_0 передается во все ее точки без изменения (*эффект Паскаля*); на любой горизонтальной плоскости, проведенной через однородную жидкость в ее замкнутом объеме, давление одно и тоже. Объем считается замкнутым, если две его любые точки можно соединить непрерывной линией. На рис.2.1, *в*

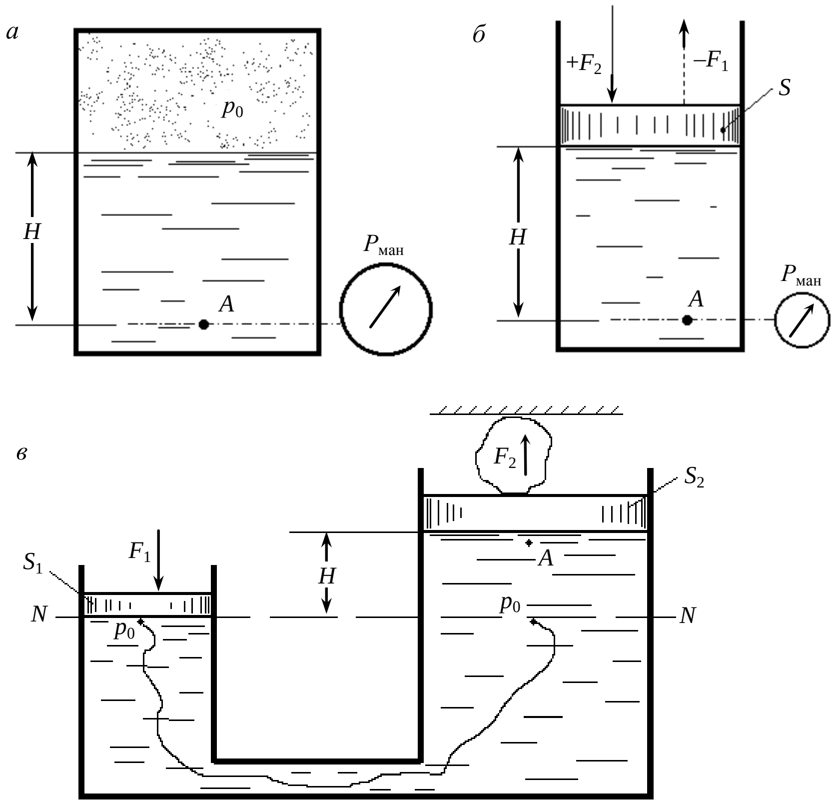


Рис.2.1

для однородной жидкости на горизонтальной плоскости N-N $p_0 = \text{const}$; линия $p_0 - p_0$ непрерывна. Эти признаки, в частности, используют при определении давления с помощью *жидкостных приборов*.

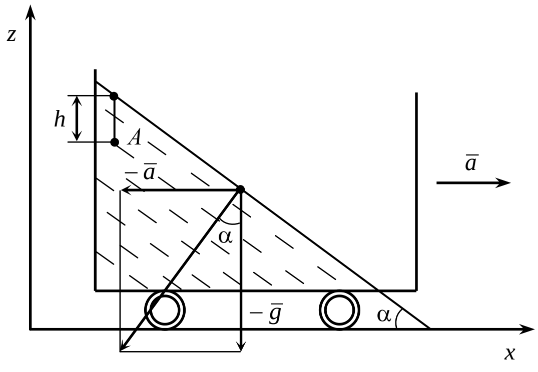


Рис.2.2

Относительный покой жидкости может соответствовать, например:

• движению сосуда с жидкостью по горизонтальной плоскости с ускорением a (рис.2.2) и тогда давление в точке A определяется по формуле

$$p_A = p_0 + \rho g h, \tag{2.4}$$

где h – глубина погружения точки A (по вертикали) под поверхностью уровня с давлением p_0, а угол α наклона свободной поверхности жидкости к горизонту определяется по формуле

$$\alpha = \operatorname{arctg}\frac{a}{q}; \tag{2.5}$$

• равномерному вращению сосуда с жидкостью с угловой скоростью ω относительно вертикальной оси (рис.2.3). При этом уравнение свободной поверхности жидкости (параболоид вращения)

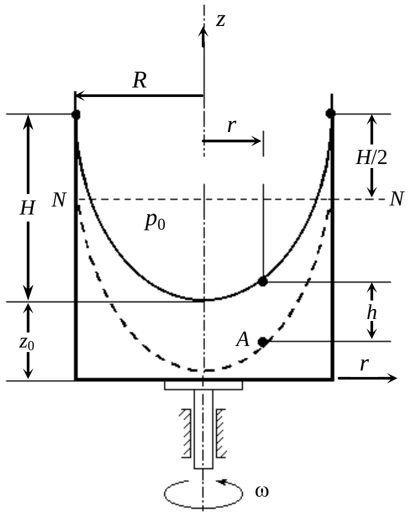


Рис.2.3

$$z = \frac{\omega^2 r^2}{2g} + z_0, \qquad (2.6)$$

где r и z – цилиндрические координаты, вращающиеся вместе с сосудом; z_0 – вертикальная координата вершины параболоида от дна сосуда или иной заданной горизонтальной плоскости.

Высота параболоида при радиусе сосуда R

$$H = \frac{\omega^2 R^2}{2g}. \qquad (2.7)$$

Начальное положение жидкости в сосуде ($\omega = 0$) соответствует плоскости N-N (рис.2.3). Давление p в любой точке на глубине h (например, в точке A) под свободной поверхностью с давлением p_0 определяется по уравнению (2.3).

Полная сила давления жидкости на плоскую фигуру (например, эллипс – в плоскости стенки сосуда, след которой в плоскости чертежа – линия AB), наклоненную к горизонту под углом α, определяется по формуле (рис.2.4)

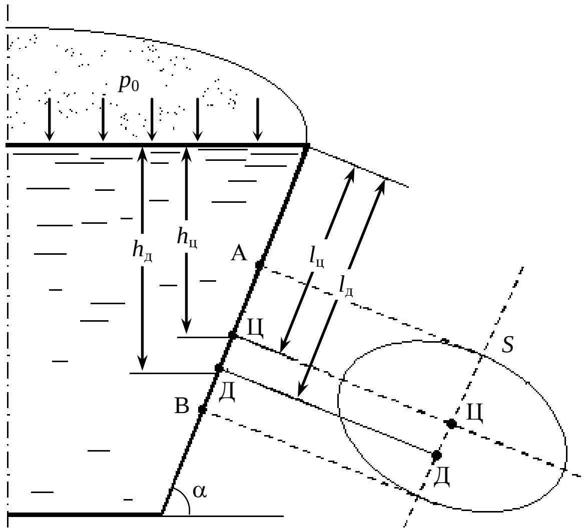


Рис.2.4

$$F_{\text{полн}} = (p_0 + \rho g h_\text{ц})S = (p_0 + \rho g l_\text{ц} \sin\alpha)S = p_\text{ц} S, \qquad (2.8)$$

где $h_\text{ц}$ – глубина погружения центра тяжести фигуры; $h_\text{ц} = l_\text{ц} \sin\alpha$; $l_\text{ц}$ – расстояние от свободной поверхности до центра тяжести, отсчитываемое в плоскости фигуры; S – площадь фигуры; $p_\text{ц}$ – гидростатическое давление в центре тяжести фигуры.

Точка приложения силы F (центр давления Д) лежит ниже центра тяжести Ц и определяется по формуле:

$$\left.\begin{aligned} h_\text{д} &= l_\text{д} \sin\alpha \\ l_\text{д} &= l_\text{ц} + \frac{I_\text{ц}}{S l_\text{ц}} \end{aligned}\right\}, \qquad (2.9)$$

где $l_\text{ц}$ и $l_\text{д}$ – соответственно расстояние по наклонной плоскости стенки от свободной поверхности до точек Ц и Д; $I_\text{ц}$ – центральный момент инерции фигуры.

Для некоторых фигур (рис.2.5) силы от давления столба жидкости и координаты центра давления $l_\text{д}$ даны в табл.2.1; все размеры даны в плоскости стенки AB, которая изображена при α = 90°. Расположение фигуры ниже свободной поверхности жидкости отмечено координатой L. Для перехода к высотам $h_\text{ц}$ и $h_\text{д}$ следует воспользоваться связью вида $h = l\sin\alpha$.

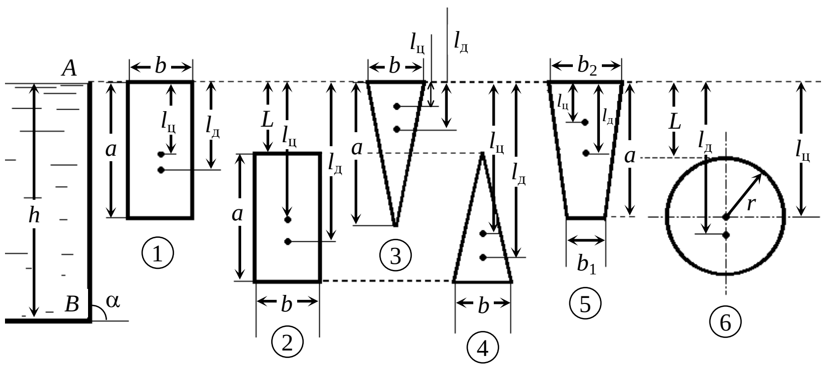


Рис.2.5

Таблица 2.1

Фигура	Вариант	S	$L_ц$	$l_д$	F
Прямоугольник	1	ab	$\frac{a}{2}$	$\frac{2}{3}a$	$\frac{1}{2}\rho g a^2 b\sin\alpha$
Прямоугольник	2	ab	$L+\frac{a}{2}$	$\frac{a(2a+3L)}{3(a+2L)}+L$	$\rho g ab\left(\frac{a}{2}+L\right)\sin\alpha$
Треугольник	3	$\frac{1}{2}ab$	$\frac{1}{3}a$	$\frac{1}{2}a$	$\frac{1}{6}\rho g a^2 b\sin\alpha$
Треугольник	4	$\frac{1}{2}ab$	$L+\frac{2}{3}a$	$L+\frac{4a(2a+3L)+a^2}{6(2a+3L)}$	$\frac{1}{16}\rho g ab(2a+3L)\sin\alpha$
Трапеция	5	$\frac{1}{2}a(b_1+b_2)$	$\frac{a(2b_1+b_2)}{3(b_1+b_2)}$	$\frac{a}{2}\cdot\frac{3b_1+b_2}{2b_1+b_2}$	$\frac{1}{6}\rho g a^2(2b_1+b_2)\sin\alpha$
Круг	6	πr^2	$L+r$	$L+r+\frac{r^2}{4(L+r)}$	$\rho g\pi r^2(r+L)\sin\alpha$

Для вертикальных фигур $\alpha = 90°$, $l_ц = h_ц$, $l_д = h_д$; для горизонтальных фигур $\alpha = 0$, $l_ц = l_д = h_ц = h$.

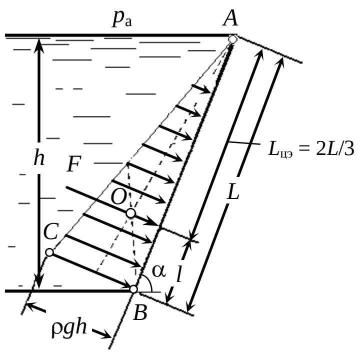


Рис.2.6

Силу давления жидкости F на плоские стенки с постоянной шириной b и центры давления $l_д, h_д$ можно также определить графически с помощью *эпюр давления* [9]. При этом

$$F = S_э b, \qquad (2.10)$$

где $S_э$ – площадь эпюры давления.

Абсциссы эпюры давления выражают давление в соответствующих точках с учетом p_0 (или без учета).

В открытых резервуарах эпюра давления на прямоугольную стенку AB есть прямоугольный треугольник ABC (рис.2.6) с основанием ρgh и высотой h (или $L\sin\alpha$ – для наклонной стенки).

В закрытых резервуарах при наличии избыточного давления p_0 на свободной поверхности искомая эпюра есть трапеция $ABCД$ (рис.2.7) с основаниями: верхним p_0 и нижним $p_0 + \rho gh$ и высотой h (или $L\sin\alpha$ – для наклонной стенки).

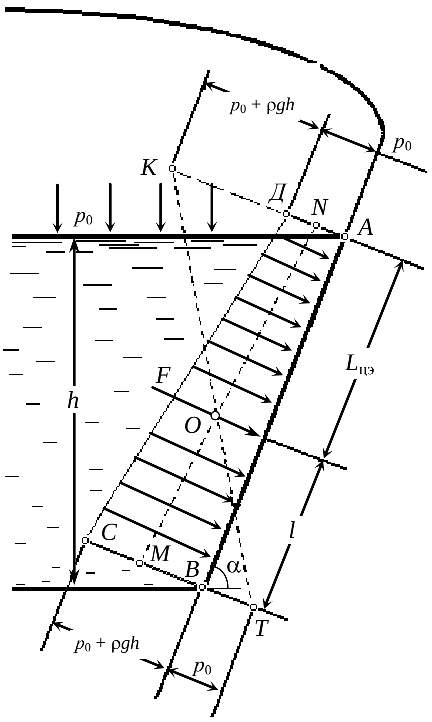


Рис.2.7

Аналогичная эпюра будет и в случае открытого сосуда, но если при этом сила F определяется не на всю смоченную стенку ABC (рис.2.8), а только на ее нижнюю часть BC.

Линия действия искомой силы F проходит через центр тяжести эпюры давления (точка O на рис.2.6, 2.7 и 2.8).

Центр давления также можно найти аналитически по формулам:

- для рис.2.7

$$h_{цэ} = \frac{h}{3}\frac{3p_0 + 2\rho gh}{2p_0 + \rho gh} = l_{цэ}\sin\alpha; \qquad (2.11)$$

- для рис.2.8

$$h_{цэ} = h_1 + \frac{h - h_1}{3}\frac{h_1 + 2h}{h_1 + h}. \qquad (2.12)$$

При двухстороннем давлении жидкости на стенку центр тяжести O результирующей эпюры давления можно найти как графически, так и аналитически:

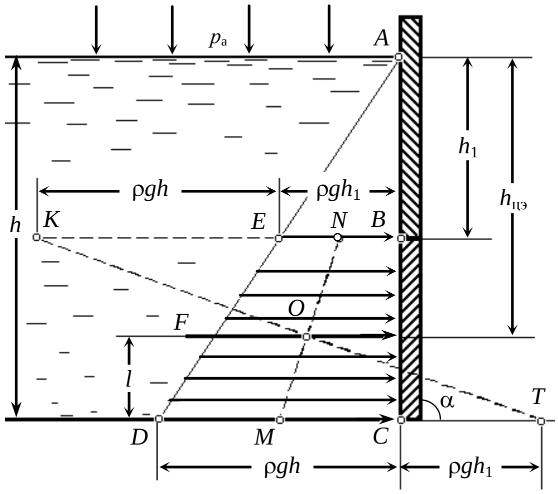


Рис.2.8

• результирующая сила от избыточного давления

$$F = F_1 - F_2 = S_э b =$$

$$= \rho g b \frac{H_1^2 - H_2^2}{2\sin\alpha}\ ; \quad (2.13)$$

• плечо результирующей силы давления

$$l = \frac{H_1^3 - H_2^3}{3\sin\alpha(H_1^2 - H_2^2)}. \quad (2.14)$$

Сила избыточного давления жидкости на *криволинейные цилиндрические поверхности* (рис.2.9) определяется по формуле

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_z^2}\ , \qquad (2.15)$$

где F_x – горизонтальная составляющая силы; F_z – вертикальная составляющая силы.

Составляющая F_x равна силе давления на вертикальную (плоскую) проекцию криволинейной поверхности. Составляющая F_z равна весу *тела давления* V.

Тело давления *действительно* (знак плюс, F_z направлена вниз), если находится в жидкости, и *фиктивно* (знак минус, F_z направлена вверх), если находится за пределами жидкости. Объем тела давления V – объем вертикального столба жидкости (действительного или фиктивного), опирающегося на заданную криволинейную поверхность и ограниченного сверху пьезометрической плоскостью.

На рис.2.9 стенка представлена четвертью кругового цилиндра радиусом r; на свободной поверхности атмосферное давление $p_а$; свободная поверхность в данном случае является пьезометрической плоскостью. Жидкость смачивает стенку снизу. Тело давления

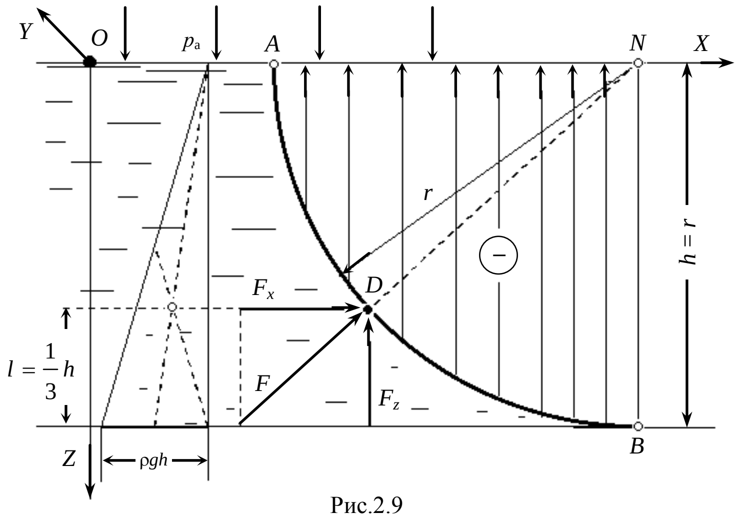


Рис.2.9

(в сечении – четверть круга) жидкости не принадлежит, следовательно, оно фиктивно (знак минус), а вертикальная составляющая силы F (F_z) направлена вверх.

Горизонтальная составляющая

$$F_x = \rho g S = \rho g r b, \tag{2.16}$$

где b – длина поверхности вдоль оси OY; $S = S_{yoz}$ – площадь проекции ADB на плоскость YOZ;

вертикальная составляющая

$$F_z = \rho g V = \rho g \frac{1}{4}\pi r^2 b, \tag{2.17}$$

где V – объем фиктивного тела давления, $V = S_{NADB} b$; S_{NADB} – площадь тела давления в плоскости XOZ, $S_{NADB} = \frac{1}{4}\pi r^2$.

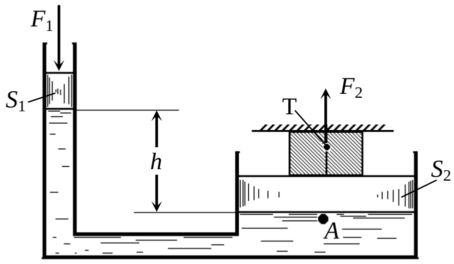
Подставив найденные значения F_x и F_z в (2.15), найдем результирующую силу F. Составляющая F_x действует на плече $l = \frac{1}{3}h$ (здесь $h = r$); направление равнодействующей F должно проходить через центр кривизны N; точка D есть точка приложения силы F.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 2.1. Найти силу F_2', сжимающую тело Т до начала действия усилия F_1 и после его приложения F_2''.

Дано: $F_1 = 120$ Н; $h = 20$ см; $S_1 = 0{,}01$ м^2; $S_2 = 10$ м^2; $\rho = 900$ кг/м^3.

Трением и весом поршней пренебречь.



К примеру 2.1

Решение. До момента приложения силы F_1 в точке A под большим поршнем действует давление от столба жидкости высотой h

$$p_A' = \rho g h = 900 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}2 = 1765{,}8 \text{ Па};$$

при этом тело Т испытывает силу

$$F_2' = p_A' S_2 = 1765{,}8 \cdot 10 = 17658 \text{Н}.$$

После приложения силы F_1 в точке A по закону Паскаля возникнет давление

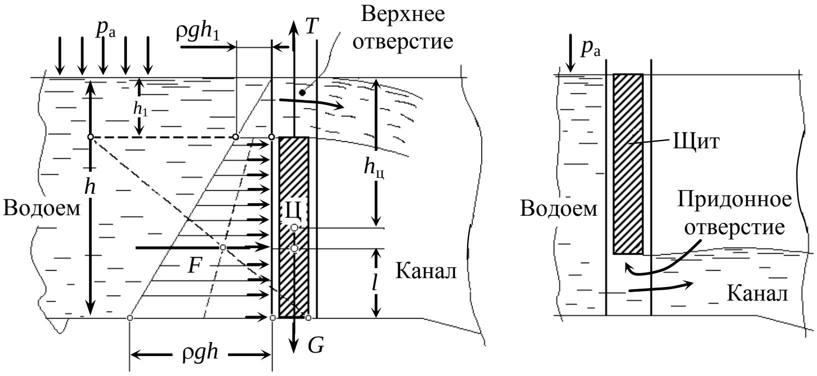
$$p_A'' = \frac{F_1}{S_1} + \rho g h = \frac{120}{0{,}01} + 1765{,}8 = 13765{,}8 \text{ Па};$$

при этом тело Т будет испытывать силу

$$F_2'' = p_A'' S_2 = 13765{,}8 \cdot 10 = 137658 \text{ Н}.$$

Ответ: $F_2' \approx 17{,}66$ кН; $F_2'' \approx 137{,}66$ кН.

Пример 2.2. Водоем частично перекрыт щитом, который находится в нижнем положении, оставляя свободным верхнее прямоугольное отверстие. По мере накопления воды в водоеме она начинает переливаться через верхнее отверстие в «сухую» часть канала и отводится по уклону канала от водоема. При необходимости щит переводят из нижнего положения в верхнее, при этом вода перетекает в канал через придонное отверстие.



К примеру 2.2

Вертикальный щит шириной b перемещают с усилием T в пазах с коэффициентом трения f. Вес щита G. Высота верхнего отверстия h_1, высота слоя воды в водоеме h.

Определить усилие T и плечо ℓ приложения силы F от давления воды на щит в его нижнем положении если задано: f = 0,05; h_1 = 0,5 м; G = 2 кН; α = 90°; b = 2 м; h = 3,5 м; $\rho_в = 1000$ кг/м^3.

Решение. Подъемное усилие

$$T = Ff + G, \tag{2.18}$$

где F – сила давления воды на щит высотой h-h_1 и шириной b. Согласно табл.2.1 (вариант 2)

$$F = \rho gab\left(\frac{a}{2} + L\right)\sin\alpha;$$

в обозначениях рисунка к примеру 2.2 (см. также рис.2.8)

$$F = \rho g\left(h - h_1\right)\cdot b\cdot\left(\frac{h-h_1}{2} + h_1\right)\sin\alpha = \frac{1}{2}\rho gb\left(h^2 - h_1^2\right)\sin\alpha =$$

$$= \frac{1}{2}\cdot 10^3\cdot 9{,}81\cdot 2\left(3{,}5^2 - 0{,}5^2\right)\cdot 1 = 117720\text{Н}.$$

Тогда искомое усилие

$$T = 117720\cdot 0{,}05 + 2000 = 7886\,\text{Н} \approx 7{,}9\,\text{кН}.$$

Плечо приложения силы F согласно табл.2.1 (вариант 2) $l = h - l_{\text{табл}}$,

$$l_{\text{табл}} = \frac{a}{3}\frac{2a + 3L}{a + 2L} + L.$$

В обозначениях рисунка к примеру 2.2: $a = h - h_1 = 3{,}5 - 0{,}5 = 3$ м; $L = h_1 = 0{,}5$ м. Тогда

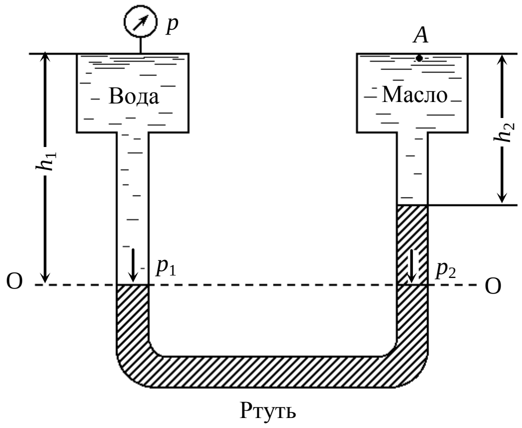
$$l = 3{,}5 - \left(\frac{3}{3}\frac{2 \cdot 3 + 3 \cdot 0{,}5}{3 + 2 \cdot 0{,}5} + 0{,}5\right) = 1{,}125\,\text{м}.$$

Замечание: плечо l может быть найдено также графически.

Ответ: $T \approx 7{,}9$ кН; $l = 1{,}125$ м.

Пример 2.3. Определить вид и величину давления p_A в верхней точке правого сосуда, если в верхней точке левого сосуда манометрическое давление $p_{\text{м}} = 0{,}1$ ат. Положение столбиков ртути в U-образной трубке относительно верхней точки сосудов: $h_1 = 500$ мм, $h_2 = 400$ мм. Относительная плотность масла $\delta_{\text{м}} = 0{,}88$.

Решение. Действительная плотность масла $\rho_{\text{м}} = \delta_{\text{м}}\rho_{\text{ст}} = 0{,}88 \times$ $\times 1000 = 880\,\text{кг/м}^3$, где $\rho_{\text{ст}} = \rho_{\text{в}} = 1000$ кг/м^3 – плотность стандартного вещества, т.е. дистиллированной воды.



К примеру 2.3

Манометрическое давление $p_{\text{м}} = 0{,}1 \cdot 98100 = = 9810\,\text{Па}$. Воспользуемся *условием равновесия жидкости* – проведем горизонтальную плоскость 0-0 по однородной жидкости (ртуть) в ее замкнутом объеме; при этом в левом (p_1) и правом (p_2) коленах трубки абсолютное давление будет одинаковым, т.е. $p_1 = p_2$.

Согласно основному уравнению гидростатики (2.3) абсолютное давление на плоскость 0-0 в левом колене $p_1 = (p_а + p_м) + \rho_в g h_1$ и аналогично – в правом $p_2 = (p_a + p_A) + [\rho_м g h_2 + \rho_р g(h_1 - h_2)]$. Или, приравнивая правые части, имеем

$$p_а + p_м + \rho_в g h_1 = p_а + p_A + \rho_м g h_2 + \rho_р g(h_1 - h_2).$$

Находим искомое давление

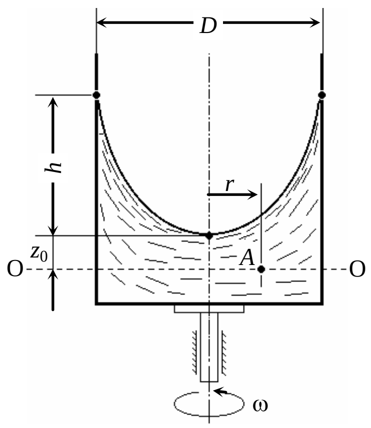
$$p_A = p_м + \rho_в g h_1 - \rho_м g h_2 - \rho_р g(h_1 - h_2) = 9810 + 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}5 -$$
$$- 880 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}4 - 13600 \cdot 9{,}81 \cdot (0{,}5 - 0{,}4) = -2079{,}7\ \text{Па} = -0{,}0212\ \text{ат}.$$

Полученный результат говорит о том, что в точке A имеет место отрицательное избыточное давление или вакуумметрическое.

Ответ: $p_A = p_{вак} \approx 2{,}08$ кПа.

Пример 2.4. Цилиндрический открытый сосуд с водой вращается вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью ω. Диаметр сосуда $D = 0{,}8$ м.

Определить угловую скорость вращения ω и число оборотов n сосуда, при которых глубина h воронки (высота параболоида вращения) была бы не более 0,9 м, а также линейную скорость v частиц воды у боковой поверхности сосуда и давление p_A в плоскости 0-0, расположенной ниже вершины параболоида на расстоянии $z_0 = 0{,}2$ м. Радиус расположения точки A $r = 0{,}2$ м.



К примеру 2.4

Решение. В соответствии с (2.7) высота параболоида при радиусе $R = D/2 = 0{,}4$ м

$$h = \frac{\omega^2 R^2}{2g};$$

$$\omega = \frac{1}{R}\sqrt{2gh} = \frac{1}{0{,}4}\sqrt{2\cdot 9{,}81\cdot 0{,}9} = 10{,}505 \text{ рад/с}$$

и

$$n = \frac{30\omega}{\pi} = \frac{30\cdot 10{,}505}{3{,}14} \approx 100 \text{ об/мин.}$$

При этом скорость частиц жидкости на радиусе $R = 0{,}4$ м $v = \omega R = 10{,}505\cdot 0{,}4 = 4{,}202$ м/с.

По формуле (2.6) расстояние точки A до свободной поверхности на радиусе $r = 0{,}2$ м

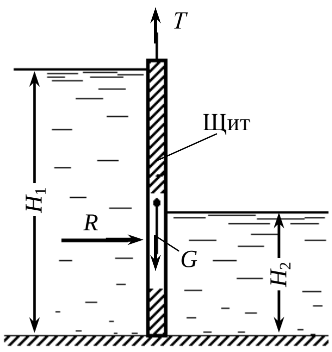
$$Z = Z_0 + \frac{\omega^2 r^2}{2g} = 0{,}2 + \frac{10{,}505^2\cdot 0{,}2^2}{2\cdot 9{,}81} = 0{,}425 \text{ м};$$

$$p_A = \rho g Z = 1000\cdot 9{,}81\cdot 0{,}425 = 4169 \text{ Па.}$$

Ответ: $\omega = 10{,}505$ рад/с; $n = 100$ об/мин; $v = 4{,}202$ м/с; $p_A = 4169$ Па.

ЗАДАЧИ

Задача 2.1. Канал прямоугольного сечения шириной $b = 3{,}5$ м перегорожен щитом, который можно перемещать усилием T в вертикальных пазах боковых стен канала.



К задаче 2.1

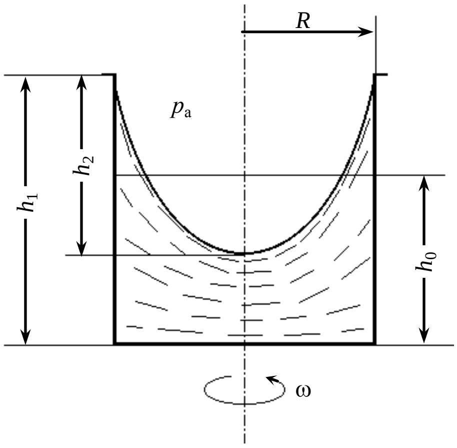
Определить графически и аналитически равнодействующую силу R от двухстороннего действия на щит воды и аналитически подъемное усилие T, если коэффициент трения щита в пазах $f = 0{,}35$, вес щита $G = 2{,}5$ кН, уровни воды $H_1 = 4$ м и $H_2 = 1{,}2$ м.

Ответ: $R \approx 250$ кН; $T \approx 90$ кН.

Задача 2.2. Вертикальный открытый цилиндрический сосуд радиусом $R = 0{,}5$ м и начальным слоем жидкости высотой $h_0 = 1{,}5$ м равномерно вращается со скоростью $n = 100$ об/мин.

Определить глубину воронки h_2 и минимальную высоту сосуда h_1, при которой жидкость не выливается из сосуда при его вращении.

Ответ: $h_2 = 1{,}39$ м; $h_1 = 2{,}195$ м.



К задаче 2.2

Задача 2.3. Цилиндрический сосуд диаметром $D = 0{,}4$ м с горловиной диаметром $d = 0{,}1$ м заполнен водой на высоту $h = 0{,}6$ м. К поршню в горловине приложена сила $F = 50$ Н.

Определить силу $F_д$ от манометрического давления на дно сосуда. Трением поршня о стенки горловины пренебречь.

Ответ: $F_д = 1{,}54$ кН .

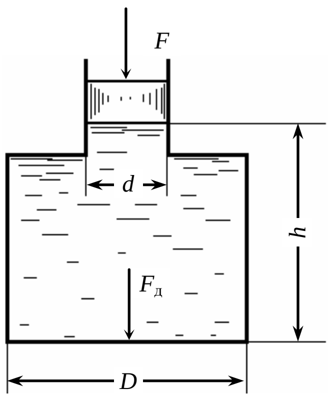
Задача 2.4. В открытом сосуде находится слой воды высотой 1,5 м и слой нефти высотой 4,2 м ($\rho_н = 900$ кг/м^3).

Определить величину манометрического давления $p_м$ на уровне дна сосуда.

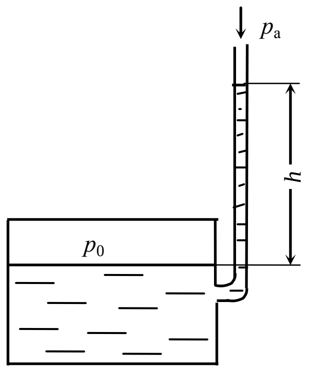
Ответ: $p_м = 0{,}528$ ат.

Задача 2.5. Определить величину абсолютного давления $p_{абс}$ на свободной поверхности жидкости в сосуде, если в пьезометре вода поднялась на высоту $h = 1{,}8$ м.

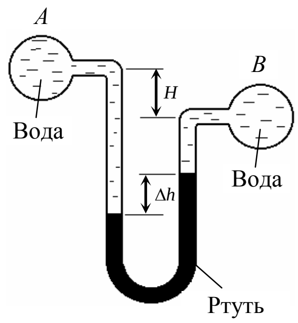
Ответ: $p_{абс} = 115{,}76$ кПа.



К задаче 2.3



К задаче 2.5



К задаче 2.6

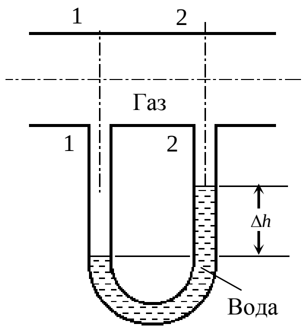
Задача 2.6. Определить разность давлений Δp в колбах A и B с водой, если разность уровней ртути в дифманометре Δh = 23 см. Разность уровней осей колб H = 1 м.

Ответ: Δp = 18507 Па.

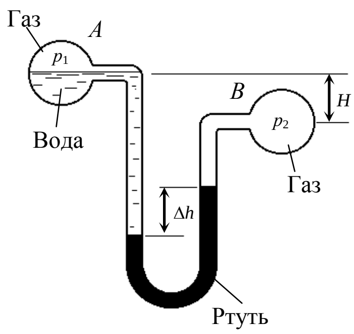
Задача 2.7. Определить разность давлений Δp в сечениях 1-1 и 2-2 газопровода, если разность уровней воды в коленах дифманометра Δh = 24 см. Плотность газа ρ = 0,84 кг/м^3.

Ответ: $\Delta p = 2352$Па.

Задача 2.8. Определить давление p_2 в сосуде B с воздухом, если в сосуде A с водой избыточное давление p_1 равно 2 ат, а раз-



К задачам 2.7



К задаче 2.8

ность уровней ртути в U-образной трубке, соединяющей сосуды, Δh = 1,6 м. Разность уровней сосудов H = 1 м, плотность ртути ρ = 13544 кг/м^3.

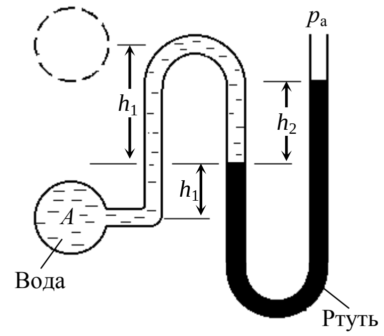
Ответ: p_2 = 9119 Па.

Задача 2.9. В вертикальной скважине с глинистым раствором находится бурильный инструмент (буровая штанга, буровая коронка) массой m = 88 т. Определить нагрузку F на подъемное устройство, удерживающее (или поднимающее) буровой инструмент. Плотность глинистого раствора $\rho_г$ = 1180 кг/м^3, средняя плотность материала бурового инструмента $\rho_б$ = 7850 кг/м^3.

Ответ: F = 733513 Н.

Задача 2.10. Определить манометрическое давление воды в сосуде A при разности высот ртути в дифманометре h_2 = 25 см. Центр сосуда A расположен ниже линии раздела между водой и ртутью на расстоянии h_1 = 40 см.

Ответ: $p_м$ = 37,278 кПа.

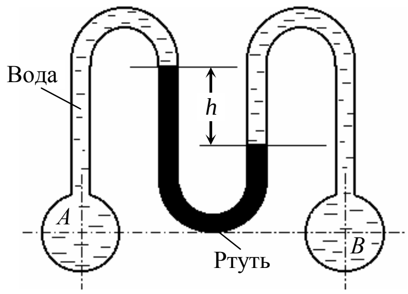


К задачам 2.10, 2.11, 2.12

Задача 2.11. Определить разность высот ртути h_2 в дифманометре.

Центр сосуда A расположен на высоте h_1 = 0,4 м выше линии раздела между водой и ртутью. Манометрическое давление в сосуде A $p_м$ = 37,278 кПа.

Ответ: h_2 = 0,309 м.



К задаче 2.13

Задача 2.12. Центр сосуда A расположен ниже линии раздела между водой и ртутью на высоте h_1. Манометрическое давление в сосуде A $p_м$ = 39,24 кПа;

разность высот в дифманометре h_2 = 0,24 м.

Определить высоту h_1.

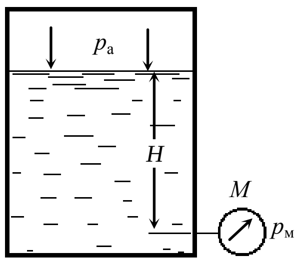
Ответ: h_1 = 0,736 м.

Задача 2.13. В трубопроводах *A* и *B* вода под давлением.

Разность высот ртути в дифманометре h = 0,2 м; плотность ртути $\rho_р$ = 13600 кг/м^3; плотность воды $\rho_в$ = 1000 кг/м^3.

Определить разность давлений Δp в трубопроводах *A* и *B*.

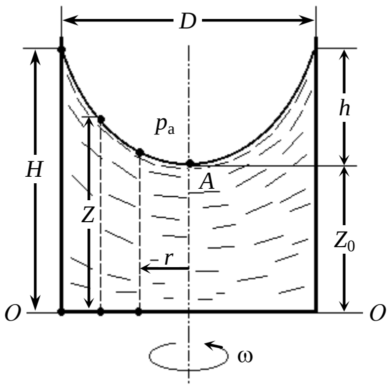
Ответ: Δp = 24,721 кПа.



К задаче 2.14

Задача 2.14. На какой высоте *H* над манометром *M* находится уровень нефти плотностью $\rho_н$ = 840 кг/м^3, если манометр показывает давление $p_м$ = 1,21 × × 10^5 Па, а на свободной поверхности нефти имеет место давление: 1) $p_{о.изб}$ = 1 ат; 2) $p_0 = p_а$?

Ответ: 1) H = 2,78 м; 2) H = 14,68 м.



К задаче 2.15

Задача 2.15. При вращении открытого цилиндрического сосуда с водой с постоянной угловой скоростью ω вода поднялась над дном сосуда на высоту H = 2 м.

Определить манометрическое давление p на дне: в центре сосуда $p_о$ и через каждые 20 см от оси до стенки, а также расстояние Z_0 от дна сосуда до вершины параболоида (точка *A*).

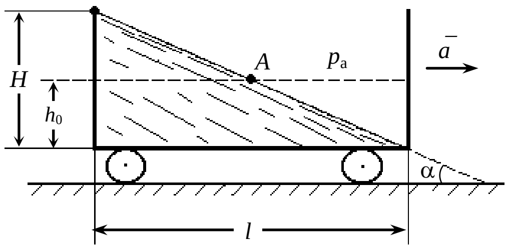
Диаметр сосуда D = 1,2 м, число оборотов сосуда n = 60 об/мин.

Ответ: Z_0 = 1,276 м; $p_о$ = 12521 Па; p_{02} = 13310 Па; p_{04} = 15676 Па; p_{06} = 19620 Па.

Задача 2.16. Цилиндрический открытый сосуд заполнен водой на высоту h_0 = 0,24 м. Диаметр сосуда D = 0,6 м; высота сосуда H = 0,36 м.

Определить максимальные обороты n_{max}, при которых вода не будет выливаться из сосуда при его равномерном вращении.

Ответ: n_{max} = 69,1 об/мин.

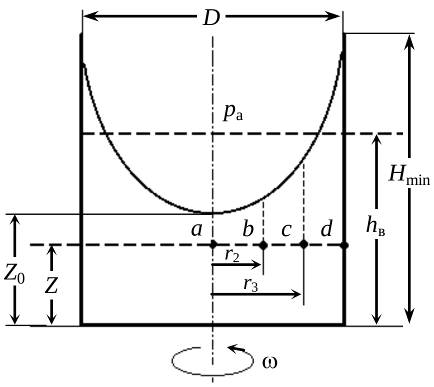


К задаче 2.17

Задача 2.17. Цистерна заполнена жидкостью до уровня h_0 = 2 м. Длина цистерны l = 20 м. Определить высоту H борта цистерны из условия отсутствия перелива через него жидкости при движении цистерны по горизонтали с ускорением a = 1,8 м/с^2.

Ответ: $H \geq$ 3,83 м.

Задача 2.18. В покоящемся цилиндрическом сосуде диаметром D = 0,6 м находится вода с высотой слоя $h_в$ = 0,8 м. Определить абсолютное гидростатическое давление $p_{абс}$ при вращении сосуда с частотой n = 90 об/мин для точек a, b, c, d, расположенных на окружностях радиусами соответственно r_1 = 0, r_2 = 0,1 м, r_3 = 0,2 м и r_4 = 0,3 м в плоскости a-d, отстоящей от дна сосуда на расстоянии Z = 0,4 м.



К задачам 2.18 и 2.19

Ответ: $p_{абс.a}$ = 100028 Па; $p_{абс.b}$ = 100471 Па; $p_{абс.c}$ = = 101802 Па; $p_{абс.d}$ = 104021 Па.

Задача 2.19. Цилиндрический сосуд диаметром D = 0,4 м с водой вращается с постоянным числом оборотов n = 150 об/мин; при этом вершина параболоида отстоит от дна сосуда на величину $Z_о$ = 35 см.

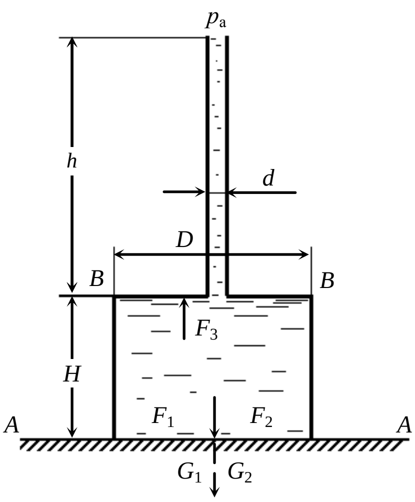
Определить: 1) абсолютное давление $p_{абс}$ на дне сосуда в точках, расположенных на окружности радиуса соответственно 5, 10 и 20 см; 2) начальный уровень воды $h_в$ до вращения сосуда; 3) минимальную высоту H_{min} сосуда, при которой жидкость не будет переливаться через его край.

Ответ: $p_{абс.1}$ = 101842 Па; $p_{абс.2}$ = 102766 Па; $p_{абс.3}$ = 106462 Па; $h_в$ = 0,602 м; H_{min} = 0,853 м.

Задача 2.20. Металлическая бочка массой m = 35 кг, диаметром D = 0,6 м и высотой H = 0,9 м заполнена водой и установлена на жестком основании *A-A* (первый вариант). Во втором варианте в крышке *B-B* выполнено отверстие диаметром d = 2 см и к нему присоединена вертикальная труба того же диаметра d высотой h = 15 м, заполненная водой. Масса трубы m = 1,65 кг.

Определить:

1) силу F_1 манометрического давления на дно бочки без трубы и силу G_1, передаваемую бочкой с водой на основание *A-A*;



К задаче 2.20

2) силу F_2 манометрического давления на дно бочки с трубой и силу G_2, передаваемую в этом случае на основание *A-A*;

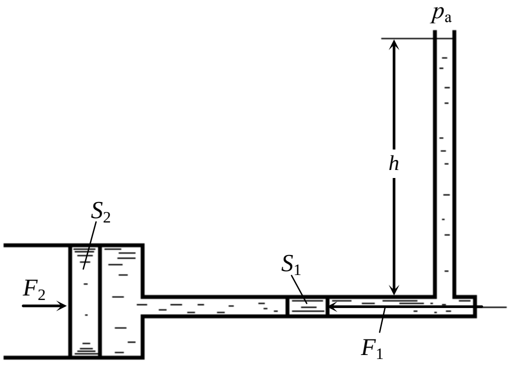
3) силу F_3 манометрического давления на крышку *B-B*.

Ответ: 1) F_1 = 2495 Н; G_1 = 2838 Н; 2) F_2 = 44080 Н; G_2 = 2900 Н; 3) F_3 = 41540 Н.

Задача 2.21. Две горизонтальные трубы диаметрами d_1 = 5 см и d_2 = 40 см соединены между собой; в этих трубах размещены поршни сечением соответственно S_1 и S_2, между которыми находится жидкость. С малой трубой соединена вертикальная трубка с водой высотой столба h = 0,8 м.

Какое усилие F_2 следует приложить к большому поршню, чтобы система находилась в равновесии, если к малому поршню приложено внешнее усилие F_1 = 98,1 Н? Трением поршней о стенки труб пренебречь.

Ответ: F_2 = 740,5 кг.

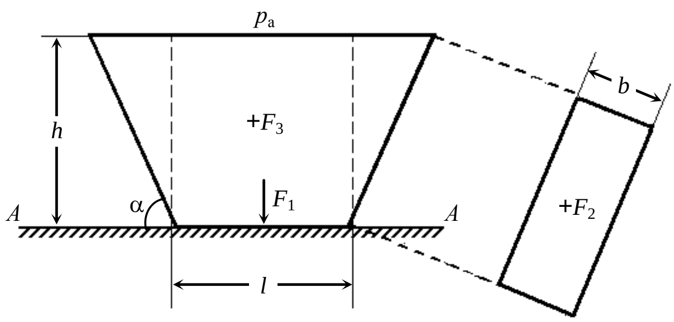


К задаче 2.21

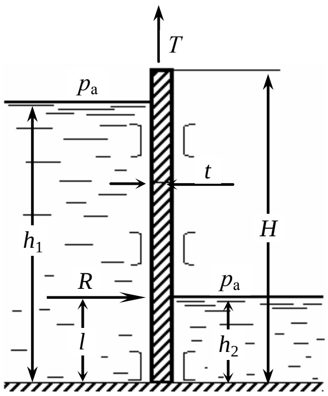
Задача 2.22. Открытый в атмосферу корытообразный резервуар полностью заполнен водой. Торцевые стенки резервуара – равнобокие трапеции с длиной основания l = 5 м и высотой h = 2 м; боковые стенки прямоугольной формы шириной b = 3 м наклонены к горизонту под углом α = 60°.

Определить силу манометрического давления на дно F_1, на боковую стенку F_2 и на торцевую стенку F_3.

Ответ: F_1 = 294,3 кН; F_2 = 68 кН; F_3 = 113,2 кН.



К задачам 2.22 и 2.23



К задаче 2.24

Задача 2.23. Для условий задачи 2.22 определить силу G, действующую на основание A-A. Собственный вес резервуара не учитывать.

Ответ: $G = 36{,}22 \cdot 10^4$ Н.

Задача 2.24. На плоский вертикальный прямоугольный затвор шириной $b = 4$ м, высотой $H = 3{,}5$ м и толщиной $t = 0{,}08$ м действует вода слева $h_1 = 3$ м и справа $h_2 = 1{,}2$ м. Затвор может перемещаться с силой T в пазах при коэффициенте трения $f = 0{,}5$. Средний удельный вес материла затвора $\gamma_з = 1{,}18 \cdot 10^4$ Н/м^3.

Определить:

• равнодействующую силу R от двухстороннего давления воды на затвор;

• плечо l приложения силы R;

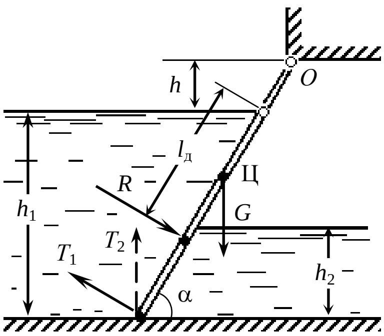
• начальное подъемное усилие T.

Ответ: $R = 148{,}33$ кН; $l = 1{,}114$ м; $T = 87{,}38$ кН.

Задача 2.25. Определить результирующую силу R двухстороннего давления воды на плоский прямоугольный наклонный затвор, имеющий возможность поворачиваться относительно оси O под действием силы T_1 или T_2.

Ширина затвора $b = 4$ м, угол наклона к горизонту $\alpha = 60°$, его вес $G = 19620$ Н. При расчете трением в шарнире O пренебречь. Сила T_1 направлена перпендикулярно плоскости затвора, сила T_2 – перпендикулярна дну канала.

Уровни воды: перед затвором $h_1 = 3$ м, за затвором $h_2 = 1{,}2$ м.



К задаче 2.25

Шарнир O расположен выше верхнего уровня на величину $h = 0{,}8$ м. Определить плечо $l_д$ приложения силы R (центр давления) и силы T_1, T_2.

Ответ: $R = 171{,}28$ кН; $l_д = 2{,}18$ м; $T_1 = 125{,}95$ кН; $T_2 = 251{,}9$ кН.

Задача 2.26. Определить равнодействующую силу R от двухстороннего давления воды на плоский затвор, перекрывающий канал шириной $b = 1$ м, и плечо l приложения силы R, если задано: $\alpha = 45°$, $h_1 = 5$ м, $h_2 = 1{,}2$ м, $h = 3$ м.

Ответ: $R = 101$ кН; $l = 1{,}31$ м.

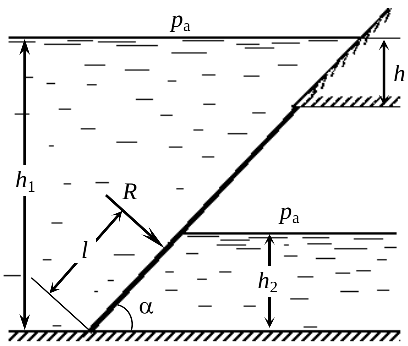
Задача 2.27. Сила давления воды передается через обшивку плоского прямоугольного щита высотой $H = 6$ м и шириной $B = 1$ м на четыре горизонтальные балки. На каких расстояниях x от свободной поверхности следует расположить балки, чтобы они были нагружены одинаково?

Ответ: $x_1 = 2$ м; $x_2 = 3{,}656$ м; $x_3 = 4{,}735$ м; $x_4 = 5{,}607$ м.

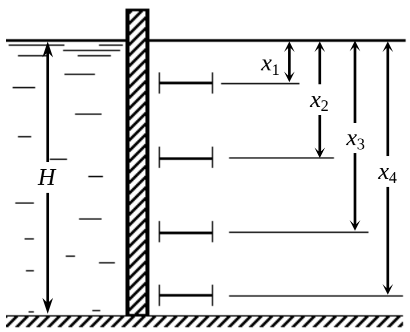
Задача 2.28. Плоский прямоугольный затвор оперт шарнирно в точке O с возможностью поворота точки A по часовой стрелке и нагружен с двух сторон силами от давления воды.

Определить расстояние x от дна до оси вращения затвора O, чтобы при уровне воды слева от затвора $H_1 \geq 2$ м затвор поворачивался автоматически, пропуская воду через образовавшуюся внизу щель. Высота слоя воды справа от затвора $H_2 = 0{,}9$ м.

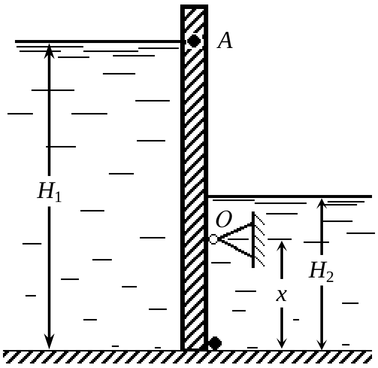
Ответ: $x = 0{,}76$ м.



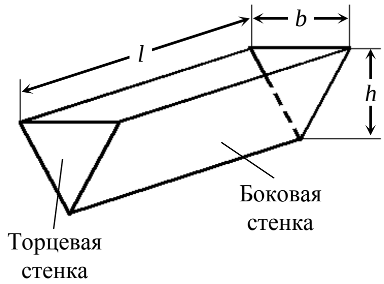
К задаче 2.26



К задаче 2.27



К задаче 2.28



К задаче 2.29

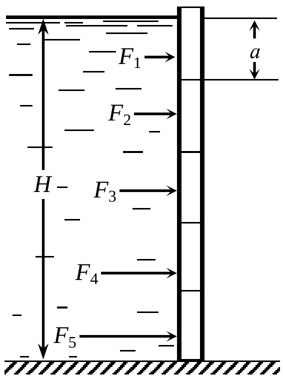
Задача 2.29. Призматический резервуар длиной $l = 2{,}8$ м, шириной $b = 1{,}2$ м и высотой $h = 1{,}4$ м заполнен жидкостью с удельным весом $\gamma = 7{,}456 \cdot 10^3$ Н/м^3. Определить силы манометрического давления на боковую $F_б$ и торцевую $F_т$ стенки резервуара и точки их приложения $l_б$ и $l_т$ (считая от свободной поверхности).

Ответ: $F_б = 22{,}3$ кН; $F_т = 2{,}92$ кН; $l_б = 1{,}015$ м; $l_т = 0{,}7$ м.

Задача 2.30. Вертикальный щит перегораживает канал трапецеидального сечения. Глубина воды в канале $H = 1{,}4$ м, ширина канала по дну $b = 1{,}6$ м, по свободной поверхности $B = 3{,}5$ м.

Определить силу F давления воды на щит и точку ее приложения $h_д$.

Ответ: $F = 21{,}46$ кН; $h_д = 0{,}867$ м.



К задаче 2.31

Задача 2.31. Вертикальный плоский прямоугольный щит, состоящий из пяти одинаковых досок шириной $a = 20$ см и длиной $l = 1{,}6$ м, сдерживает подпор воды высотой $H = 1$ м.

Определить силу F давления воды на щит в целом и на каждую доску щита в отдельности.

Ответ: $F = 7848$ Н; $F_1 = 314$ Н; $F_2 = 942$ Н; $F_3 = 1570$ Н; $F_4 = 2197$ Н; $F_5 = 2825$ Н.

Задача 2.32. Определить силу F давления воды на стенку треугольной формы, обращенную вершиной вниз, если уровень воды перед стенкой H = 1,2 м, а угол при вершине α = 90°.

Ответ: F = 5650 Н.

Задача 2.33. Плоский прямоугольный затвор шириной a = 0,4 м и высотой h = 0,3 м может поворачиваться вокруг оси O, перпендикулярной к плоскости рисунка, в указанном направлении. Определить вес груза G на конце рычага длиной l_G = 0,6 м, жестко прикрепленного к затвору, чтобы последний автоматически открывал сток воды при ее уровне H = 1,4 м.

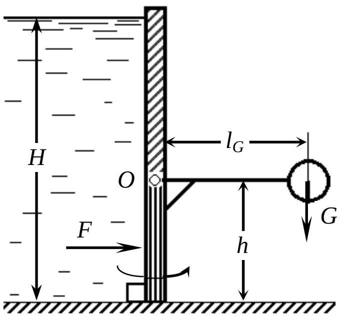
Ответ: G = 382,6 Н.

Задача 2.34. Определить силу F давления нефти плотностью $\rho_н$ = 836 кг/м^3 на крышку бокового люка и координату центра давления $h_д$, если уровень нефти над центром тяжести крышки H = 8 м, а диаметр крышки d = 0,4 м.

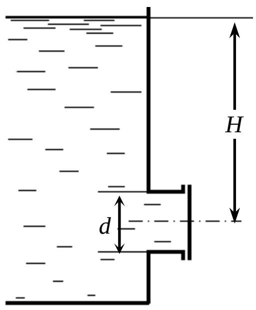
Ответ: F = 8,24 кН; $h_д$ = 8,00125 м.

Задача 2.35. Определить толщину δ стенки стального трубопровода с внутренним диаметром d = 0,2 м, предназначенного для перекачки жидкости под давлением $p = 35 \cdot 10^5$ Па, если допустимое напряжение на растяжение для материала трубы (Ст.3) составляет $[\sigma]_р = 10^8$ Па.

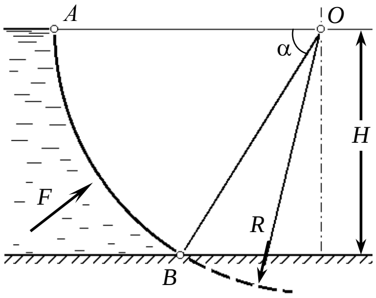
Ответ: δ = 3,5 мм.



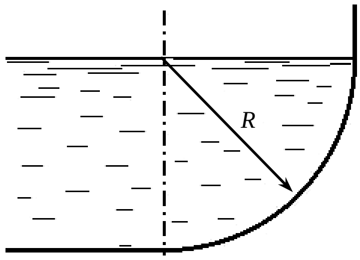
К задаче 2.33



К задаче 2.34



К задаче 2.36



К задаче 2.38

Задача 2.36. Определить силу F давления воды на цилиндрическую поверхность AB с центральным углом $\alpha = 60°$, если высота слоя воды перед ней $H = 6$ м, а ширина этой поверхности $b = 10$ м.

Ответ: $F = 2{,}28 \cdot 10^6$ Н.

Задача 2.37. Вертикальный цилиндрический резервуар высотой $H = 6{,}2$ м и диаметром $D = 17$ м полностью наполнен водой. Определить силу F давления воды на боковую стенку.

Ответ: $F = 3{,}2 \cdot 10^6$ Н.

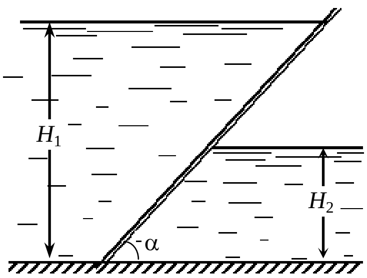
Задача 2.38. Определить силу F давления жидкости плотностью $\rho = 946$ кг/м^3 на 1/4 часть цилиндрической поверхности радиусом $R = 3$ м и шириной $b = 6$ м.

Ответ: $F = 466$ кН.

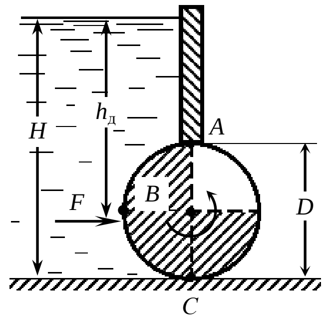
Задача 2.39. В вертикальном цилиндрическом резервуаре диаметром $D = 8$ м находится вода высотой слоя $h_1 = 1{,}2$ м и нефть плотностью $\rho_н = 900$ кг/м^3 и высотой слоя $h_2 = 6{,}6$ м. Определить манометрическое давление p у дна резервуара и силу F действия жидкости на дно.

Ответ: $p = 0{,}7 \cdot 10^5$ Па; $F = 3600$ кН.

Задача 2.40. Определить равнодействующую силу F двухстороннего давления воды на плоскую стенку шириной $b = 1{,}5$ м,



К задаче 2.40



К задаче 2.41

если ее наклон к горизонту составляет угол $\alpha = 45°$. Уровень воды перед стенкой $H_1 = 6$ м, за стенкой $H_2 = 2$ м.

Ответ: $R = 333013$ Н.

Задача 2.41. Поверхность *ABC*, представляющая собой половину кругового цилиндра (цилиндрического затвора) диаметром $D = 3$ м и шириной $b = 10$ м, подвержена одностороннему давлению воды слоем $H = 4{,}2$ м, находящейся в открытом резервуаре.

Определить силу F манометрического давления на затвор и центр давления $h_д$.

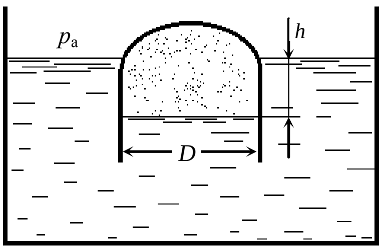
Ответ: $F = 867$ кН; $h_д = 2{,}98$ м.

Задача 2.42. Определить толщину δ стенок стального трубопровода с внутренним диаметром $D = 0{,}6$ м, находящегося под средним гидростатическим давлением $p = 2{,}943$ МН/м^2. Допустимое напряжение на растяжение материала трубы составляет $[\sigma] = 137{,}34$ МН/м^2.

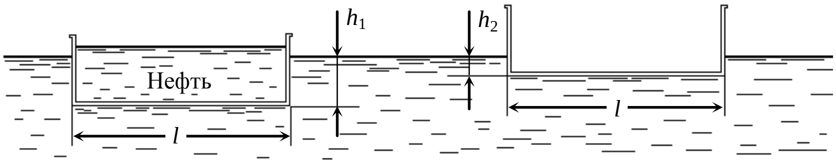
Ответ: $\delta = 6{,}4$ мм.

Задача 2.43. Определить разность уровней h воды под колоколом и в резервуаре. Масса колокола $m = 2990$ кг, его диаметр $D = 4{,}2$ м. Толщиной стенок колокола пренебречь.

Ответ: $h = 0{,}216$ м.



К задаче 2.43



К задаче 2.44

Задача 2.44. Нефтеналивное судно прямоугольного сечения с плоским дном длиной $l = 100$ м и шириной $b = 20$ м с полным грузом имеет осадку $h_1 = 2{,}5$ м, а без груза $h_2 = 0{,}4$ м. Определить массу нефти $m_н$, перевозимой судном. Плотность воды принять $\rho_в = 1000$ кг/м^3.

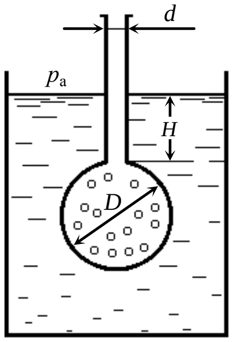
Ответ: $m_н = 4200$ т.

Задача 2.45. Плотность жидкости $\rho_ж$ измеряется ареометром, диаметр внешней трубки которого $d = 20$ мм, диаметр колбы с дробью $D = 30$ мм, а масса ареометра $m_а = 0{,}054$ кг. Определить $\rho_ж$ и ориентировочно вид жидкости (см. табл.1.1), если глубина погружения ареометра составила $H = 0{,}15$ м.

Ответ: $\rho_ж = 882$ кг/м^3, жидкость – минеральное масло.

Задача 2.46. Для определения плотности $\rho_с$ неизвестного сплава его слиток взвесили на пружинных весах дважды: один раз в воздухе, второй раз – погрузив его в воду. Вес слитка в воздухе $G = 7400$ Н, в воде $G = 1586$ Н. Определить плотность сплава $\rho_с$.

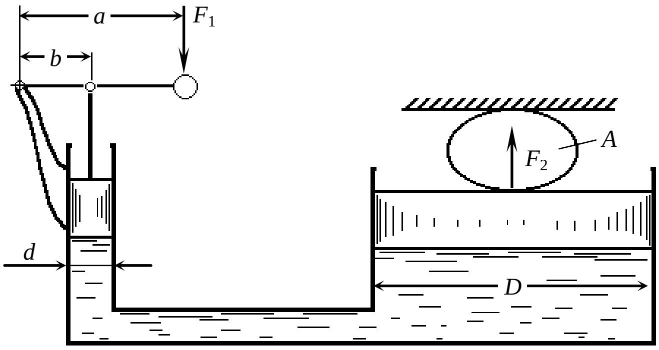
Ответ: $\rho_с = 1273$ кг/м^3.



К задаче 2.45

Задача 2.47. Деревянный призматический брус длиной l, шириной b, высотой $h = 0{,}3$ м лежит в воде плоскостью $l \times b$ с погружением H; плотность дерева бруса $\rho_д = 716$ кг/м^3. Определить глубину погружения бруса H.

Ответ: $H = 0{,}215$ м.



К задаче 2.49

Задача 2.48. Определить вес G труб общей длиной L = 2,9 км, опущенных в скважину, заполненную глинистым раствором плотностью $\rho_г$ = 1630 кг/м^3, если известно, что 1 м таких труб с муфтами в воздухе весит 300 Н. Плотность материала труб $\rho_т$ = 7500 кг/м^3.

Ответ: G = 680,9 кН.

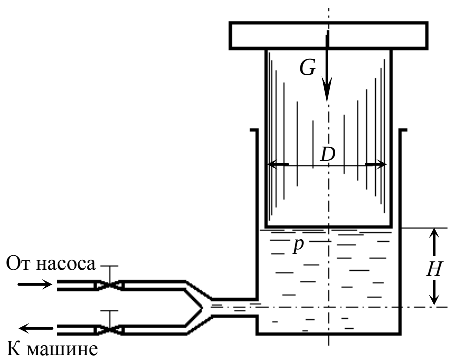
Задача 2.49. Определить силу F_1 на рычаге длиной a = 1 м, если прессуемое тело A должно быть сжато силой F_2 = 156,96 кН.

Диаметры малого поршня d = 2,5 см, большого D = 25 см; малое плечо рычага b = 0,1 м. Трением поршней и их весом пренебречь.

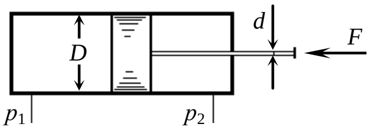
Ответ: F_1 = 156,96 Н.

Задача 2.50. Определить давление p, создаваемое гидравлическим грузовым аккумулятором, и запасенную им энергию Э, если вес его движущихся частей G = 725,94 кН, диаметр плунжера D = 0,2 м, ход плунжера H = 6 м и полный КПД аккумулятора η = 0,85.

Ответ: p = 19,65 МПа; Э = 3,7 МДж.



К задаче 2.50



К задаче 2.51

Задача 2.51. Определить полезную нагрузку F, действующую вдоль штока, если в поршневую полость гидроцилиндра подводится манометрическое давление $p_1 = 7{,}848 \cdot 10^5$ Па, а в штоковой полости существует противодавление (манометрическое) $p_2 = 0{,}981 \cdot 10^5$ Па. Диаметры поршня $D = 10$ см, штока $d = 3$ см. Трением пренебречь.

Ответ: $F = 5460$ Н.

Задача 2.52. Определить удельный вес $\gamma_б$ деревянного бруса длиной $l = 1$ м, шириной $b = 0{,}3$ м и высотой $H = 0{,}2$ м, плавающего в воде с осадкой $h = 16$ см.

Ответ: $\gamma_б = 7848$ Н/м3.

Задача 2.53. Прямоугольная баржа длиной $l = 18$ м и шириной $b = 9$ м загружена песком ровным слоем h. Осадка баржи с песком $H = 0{,}5$ м. Определить объем песка $V_п$, если его относительная плотность $\delta = 2$, и высоту слоя песка h. Массу баржи не учитывать.

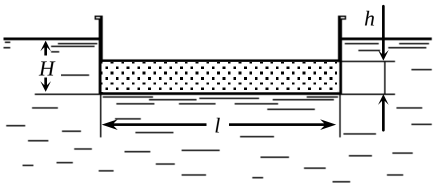
Ответ: $V_п = 40{,}5$ м^3; $h = 0{,}25$ м.

Задача 2.54. Деревянный брус длиной $l = 5$ м, высотой $h = 0{,}3$ м и шириной $b = 0{,}3$ м плавает в воде с осадкой H.

Определить осадку H бруса, если относительная плотность его материала $\delta = 0{,}7$.

Определить, сколько человек (n) средней массой $m = 67{,}5$ кг могут встать на этот брус, чтобы его осадка составила $H = h = 0{,}3$ м.

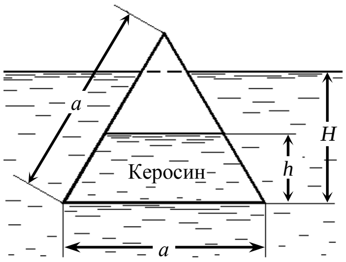
Ответ: $H = 0{,}21$ м; $n = 2$.



К задаче 2.53

Задача 2.55. Объемное водоизмещение подводной лодки $V = 600$ м^3. Для погружения лодки ее отсеки были заполнены морской водой в количестве $\Delta V = 80$ м^3. Относительная плотность морской воды $\delta = 1{,}025$. Определить, какая часть объема лодки $V_{погр}$ будет погружена в воду при $\Delta V = 0$ и чему равен вес лодки $G_л$ при $\Delta V = 0$.

Ответ: $G_л = 522{,}9 \cdot 10^4$ Н; $V_{погр}/V = 0{,}867$.



К задаче 2.56

Задача 2.56. В горизонтальный закрытый металлический бак призматической формы длиной $l = 4$ м, имеющий в вертикальном сечении равносторонний треугольник со сторонами $a = 1{,}2$ м, налит керосин ($\gamma_к = 7456$ Н/м^3) высотой слоя h. Все стенки бака имеют толщину $\delta = 5$ мм; относительная плотность металла $\overline{\rho} = 7{,}8$. Бак с керосином плавает в воде с осадкой $H = 0{,}8$ м. Определить высоту слоя керосина h.

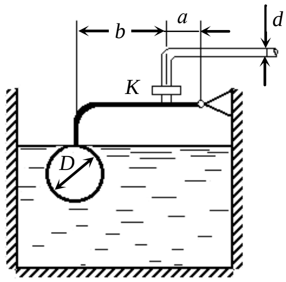
Ответ: $h = 0{,}747$ м.

Задача 2.57. Определить количество бревен n_1, из которых нужно сколотить плот, чтобы перевезти груз весом $G_г = 2550$ Н. Диаметр бревен $d = 16$ см, их длина $L = 7$ м. Осадка плота H составляет 0,13 м. Массу перевозчика принять $m = 75$ кг, а относительную плотность намокших бревен $\overline{\rho}_б = 0{,}75$. Какое количество n_2 бревен понадобится, если их верх (верх плота) будет заподлицо со свободной поверхностью воды?

Ответ: $n_1 \approx 20$ шт; $n_2 \approx 10$ шт.

Задача 2.58. Определить, при каком манометрическом давлении воды p внутри водопроводной трубы откроется клапан K, закрывающий при горизонтальном положении рычага выходное отверстие трубы, если плечо b в шесть раз больше плеча a. Диаметр трубы $d = 5$ см, а диаметр полого поплавка (шара) $D = 20$ см. Весом поплавка и рычага пренебречь.

Ответ: $p = 1{,}256 \cdot 10^5$ Па.



К задаче 2.58

РАЗДЕЛ 3

УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ

Количество жидкости, проходящее через живое сечение (ЖС) в единицу времени, называют *расходом*. Различают расходы:

- объемный

$$Q_V = \frac{V}{t} = vS, \text{ м}^3/\text{с}; \tag{3.1}$$

- массовый

$$Q_m = \rho Q_V = \frac{m}{t} = \rho vS, \text{ кг/с}; \tag{3.2}$$

- весовой

$$Q_G = \rho g Q_V = \frac{G}{t} = \rho g vS, \text{ Н/с}. \tag{3.3}$$

На пути движения жидкости (рис.3.1) конфигурация потока и поле скоростей в его живом сечении (ЖС) могут изменяться, но количество жидкости, прошедшее за время t через любое сечение, неизменно, это фиксируется *уравнением неразрывности*:

$$\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2. \tag{3.4}$$

Для капельной жидкости ее плотность ρ мало зависит от величины давления p (по крайней мере, при изменении p в пределах 10 МПа). При ρ = const выражение (3.4) будет соответствовать закону постоянства объемного расхода на рассматриваемом участке потока:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = Q_V = \text{const}. \tag{3.5}$$

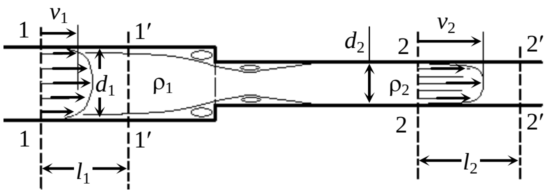


Рис.3.1

Для газа плотность ρ зависит от давления p и температуры T, поэтому при расчете газопроводов используют зависимости (3.4) и (3.2), при этом

$$\rho = \frac{p}{RT}, \qquad (3.6)$$

где R – газовая постоянная, для воздуха $R = 287$ Дж/(кг $\cdot$ К); T – абсолютная температура, К; p – давление.

Полный запас энергии E некоторого объема жидкости массой m относительно произвольной горизонтальной *плоскости сравнения* определяется выражением

$$E = mgz + m\frac{p}{\rho} + m\frac{v^2}{2}, \qquad (3.7)$$

где $mgz = E_z$ – потенциальная энергия положения, Дж; z – вертикальная координата точки или тела (z положительна, если тело расположено выше плоскости сравнения, и отрицательна – если ниже); $m(p/\rho) = E_p$ – потенциальная энергия давления, Дж; $m(v^2/2) = E_V$ – кинетическая энергия, Дж.

Энергия, отнесенная к массе m, объему V или весу G, называется *удельной энергией*. Так, энергия, приходящаяся на единицу массы,

$$E = gz + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}, \text{ Дж/кг.} \qquad (3.8)$$

Энергию, приходящуюся на единицу объема (т.е. давление), получим, разделив выражение (3.7) на V; при этом $m/V = \rho$,

$$E = \rho gz + p + \frac{\rho v^2}{2}, \text{ Дж/м}^3 = \text{Па.} \qquad (3.9)$$

Энергию, приходящуюся на единицу веса (т.е. напор), получим, разделив (3.7) на G; при этом $G = mg$,

$$E = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}, \text{ Дж/Н = м.} \qquad (3.10)$$

Связь между давлением p и напором H выражается согласно выражению (2.3) формулой

$$p = \rho g H. \qquad (3.11)$$

При движении *реальной* жидкости (ρ = const, $\mu > 0$) кинетическая энергия в сечении потока может распределяться по-разному в зависимости от режима движения и вида потока. Так, при ламинарном режиме эпюра скоростей в ЖС – парабола, при равномерном установившемся турбулентном движении эта эпюра напоминает трапецию, для струи – прямоугольник, т.е. степень равномерности распределения кинетической энергии в ЖС потока для разных условий различна. Это отражается через *коэффициент Кориолиса*, который вводят в состав кинетической энергии в формулах (3.8)-(3.10) как множитель α. Для Re < 2320 $\alpha = 2$; для Re > 2320 при равномерном движении турбулентного потока α = 1,03-1,10. С целью упрощения расчетов в последнем случае рекомендуется принимать $\alpha \approx 1$. Для струи и идеальной жидкости $\alpha = 1$.

В сечении 1-1 полная энергия (рис.3.1)

$$E_1 = z_1 + h_{p1} + h_{v1} = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g};$$

в сечении 2-2

$$E_1 = z_2 + h_{p2} + h_{v2} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g};$$

потерянная между сечениями 1-1 и 2-2 часть энергии составит

$$\Delta E_{1-2} = E_1 - E_2.$$

Здесь закон сохранения энергии имеет вид

$$E_1 = E_2 + \Delta E_{1-2}$$

или

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \left(\Delta h_l\right)_{1-2} + \left(\Delta h_{\text{м}}\right)_{1-2}. \qquad (3.12)$$

Уравнение (3.12) есть *уравнение Бернулли для реального потока* капельной жидкости.

Потери энергии (напора) по длине потока определяются формулой Дарси

$$\Delta h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \tag{3.13}$$

где λ – коэффициент гидравлического трения (или коэффициент Дарси).

Участок потока, где скорость изменяет свое направление и значение, называют *местным сопротивлением* (МС). Протяженность МС мала по сравнению с длиной прямых участков, поэтому считают, что МС длины не имеет. Эти потери определяются по формуле Вейсбаха:

$$\Delta h_{\text{м}} = \zeta \frac{v^2}{2g}, \tag{3.14}$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент Дарси в общем случае зависит от режима движения (Re) и шероховатости (Δ) твердых границ потока, т.е.

$$\lambda = f(\mathrm{Re}, \Delta). \tag{3.15}$$

Число Рейнольдса Re (безразмерное) характиризует соотношение сил инерции (через среднюю скорость v) и сил вязкого трения (через кинематический коэффициент вязкости ν)

$$\mathrm{Re} = \frac{vL}{\nu}, \tag{3.16}$$

где $\nu = \mu / \rho$; L – характерный размер ЖС.

Для ЖС круглой формы диаметром d $L = d$; для ЖС некруглой формы $L = 4R_{\text{г}}$; $R_{\text{г}}$ – гидравлический радиус,

$$R_{\text{г}} = \frac{S_{\text{ЖС}}}{\chi}, \tag{3.17}$$

где $S_{\text{ЖС}}$ – площадь живого сечения, м^2; χ – смоченный периметр, м.

Смоченный периметр – это длина линии контакта жидкости с твердыми стенками в ЖС (длина свободной поверхности жидкости в смоченный периметр не входит).

Для ламинарного режима движения (линейная зона сопротивления, $\Delta h_l = c_{\mathrm{I}} v^1$)

$$0 < \mathrm{Re} < 2320 \text{ и } \lambda_{\mathrm{I}} = \frac{64}{\mathrm{Re}}. \qquad (3.18)$$

Для общего случая турбулентного режима (Re > 2320) по А.Д.Альтшулю

$$\lambda_{\text{турб}} = 0{,}11\left(\frac{68}{\mathrm{Re}} + \frac{\Delta_{\text{э}}}{d}\right)^{0{,}25}, \qquad (3.19)$$

где $\Delta_{\text{э}}$ – эквивалентная (зернистая) шероховатость, мм.

Турбулентный режим подразделяют на три зоны сопротивления, границы между которыми ориентировочно соответствуют:

• зоне гладкого трения или зоне гидравлически гладких труб, когда толщина δ ламинарного пристенного слоя больше высоты Δ (или $\Delta_{\text{э}}$) шероховатостей, т.е. $\delta > \Delta$. При этом $\lambda_{\mathrm{II}} \neq f(\Delta)$. Эта зона соответствует $2320 < \mathrm{Re} < 10\frac{d}{\Delta}$, а коэффициент λ может быть определен по Блазиусу

$$\lambda_{\mathrm{II}} = \frac{0{,}3164}{\mathrm{Re}^{0{,}25}}; \qquad (3.20)$$

• зоне гидравлически шероховатых труб, когда $\delta \leq \Delta$. При этом ядро потока дополнительно турбулизируется, касаясь выступов шероховатости, и $\lambda_{\mathrm{III}} = f(\mathrm{Re}, \Delta)$. Эта зона примерно соответствует

$$10\frac{d}{\Delta} < \mathrm{Re} < 500\frac{d}{\Delta}; \qquad (3.19)$$

• квадратичной зоне сопротивления ($\Delta h_l = c_{\mathrm{IV}} v^2$), когда $\delta \to 0$, а $\lambda_{\mathrm{IV}} = f(\Delta)$ и не зависит от скорости потока v. Эта зона соответствует $\mathrm{Re} > 500\frac{d}{\Delta}$ и по Шифринсону

$$\lambda_{\mathrm{IV}} = 0{,}11\left(\frac{\Delta_{\text{э}}}{d}\right)^{0{,}25}. \qquad (3.21)$$

В справочниках приводятся значения λ для квадратичной зоны сопротивления. В табл.3.1 даны значения эквивалентной шероховатости для некоторых видов труб [1, 5].

Таблица 3.1

Вид и состояние труб	$\Delta_э$, мм
Трубы тянутые из стекла и цветных металлов, новые	0,001-0,002
Трубы тянутые стальные бесшовные, новые	0,01-0,02
То же, после нескольких лет эксплуатации	0,15-0,30
То же, после длительной эксплуатации, со следами коррозии	0,50-2,0
Трубы стальные сварные, новые	0,03-0,10
То же, с незначительной коррозией	0,10-0,20
То же, сильно заржавленные	0,80-1,50
Трубы чугунные, новые	0,20-0,50
То же, бывшие в эксплуатации	0,50-1,50
Трубы бетонные	~0,5

Коэффициенты местных сопротивлений ζ в общем случае зависят от режима движения (Re), расстояния между двумя МС (L), степени открытия запорного устройства и от вида МС.

В квадратичной зоне сопротивления $\zeta \neq f(\mathrm{Re})$. Справочники приводят сведения о ζ именно для этой зоны.

При ламинарном движении нужно учитывать поправку B к формуле (3.14), которая для потерь давления будет иметь вид:

$$\Delta p_м = B\zeta\rho\frac{v^2}{2}, \tag{3.22}$$

где указанная поправка может быть ориентировочно определена из следующих данных [10]:

Re	10	50	80	150	300	500	800	1000	1500	≥2300
B	60	16	9	5	2,5	1,7	1,6	1,4	1,3	1

Все справочные данные приводятся для одиночного МС, к которому жидкость подходит с неискаженной эпюрой скоростей u.

К таким эпюрам относится парабола (ламинарный режим; $\alpha = 2$, $v = 0{,}5u_{\max}$), описываемая формулой

$$u = \frac{Jg}{4\nu}\left(r^2 - y^2\right), \qquad (3.23)$$

где J – гидравлический уклон,

$$J = \frac{\Delta h_l}{l} = \frac{\Delta p_l}{\rho g l}; \qquad (3.24)$$

Δh_l и Δp_l – потери соответственно напора и давления по длине потока l; ν – кинематический коэффициент вязкости, м^2/с; r – радиус трубы, м; y – текущая координата для рассматриваемого слоя жидкости.

Любое МС искажает поле скоростей. Если между двумя смежными МС расстояние L недостаточно для восстановления нарушенной эпюры, то к МС № 2 поток подойдет с искаженной эпюрой, и коэффициент ζ_2 не будет соответствовать указанному в справочнике или полученному расчетом. По опытным данным общий коэффициент нескольких близко расположенных МС бывает меньше арифметической суммы отдельных ζ, присущих этим МС, т.е. $\left(\Sigma\zeta_i\right)_{\text{факт}} < \left(\Sigma\zeta_i\right)_{\text{справ}}$ [9].

Базовой длиной между двумя МС, достаточной для выравнивания поля скоростей, считают

$$L_{\text{баз}} \geq (20\text{-}50)d. \qquad (3.25)$$

Расчетным путем можно определить потери энергии:

• от внезапного расширения потока от сечения S_1 до сечения $S_2 > S_1$

$$\Delta h_{\text{вр}} = \zeta_{\text{вр}}\frac{v_1^2}{2g} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g} = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1\right)^2 \frac{v_2^2}{2g} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}; \qquad (3.26)$$

при $S_2 >> S_1$ (выход потока из трубы в резервуар с $v \approx 0$) $\zeta_{\text{вых}} = 1$;

• от внезапного сужения потока от сечения S_1 до сечения $S_2 < S_1$

$$\Delta h_{\text{вс}} = \zeta_{\text{вс}} \frac{v_2^2}{2g} = 0{,}5\left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right)\frac{v_2^2}{2g}; \qquad (3.27)$$

при $S_1 >> S_2$ (вход в трубу из резервуара) $\zeta_{\text{вх}} = 0{,}5$.

Данные о ζ при сочленении двух плавных колен приведены на рис.3.2 [1].

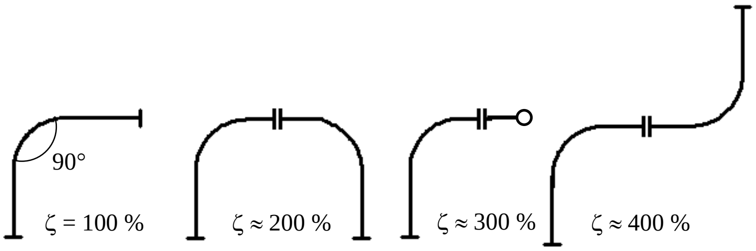


Рис.3.2

Коэффициент сопротивления диафрагмы $\zeta_{\text{д}}$, расположенной внутри трубы постоянного сечения (рис.3.3),

$$\zeta_{\text{д}} = \left(\frac{1}{n\varepsilon_{\text{д}}} - 1\right)^2, \qquad (3.28)$$

где $n = (d / D)^2$; $\varepsilon_{\text{д}}$ – коэффициент сжатия струи (по А.Д.Альтшулю [5]),

$$\varepsilon_{\text{д}} = 0{,}57 + \frac{0{,}043}{1{,}1 - n}. \qquad (3.29)$$

Коэффициент сопротивления сварного стыка на трубопроводе

$$\zeta_{\text{ст}} = 14\left(\frac{\delta}{d}\right)^{\frac{3}{2}}, \qquad (3.30)$$

где δ – высота сварного стыка (шва), выступающего внутрь трубы; d – внутренний диаметр трубы.

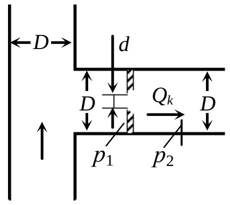


Рис.3.3

Возрастание гидравлического сопротивления, вызванное сварными швами, определяется формулой

$$K = \frac{\lambda_1}{\lambda} = 1 + \frac{\zeta_{\text{ст}}}{\lambda}\frac{d}{l}, \tag{3.37}$$

где λ_1, λ – сопротивление трубопровода, соответственно, с учетом и без учета сварных швов; l – расстояние между стыками (длина труб).

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 3.1. Определить направление движения реальной жидкости и вид местного сопротивления в наклонном трубопроводе при следующих исходных данных:

геодезическая отметка сечений z_1 = 2 м, z_2 = 6 м;

манометрическое давление p_1 = 0,1 МПа, p_2 = 0,05 МПа;

диаметры трубопровода d_1 = 200 мм, d_2 = 120 мм;

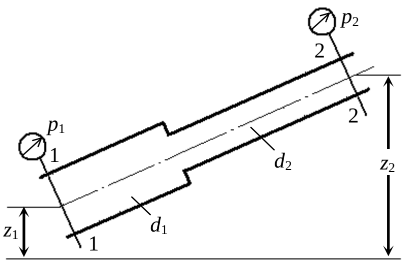
расход жидкости $Q = 3 \cdot 10^{-3}$ м^3/с;

кинематический коэффициент вязкости жидкости $\nu = 10 \cdot 10^{-6}$ м^2/с.

Решение. Жидкость должна двигаться от области с большей полной удельной энергией в область с меньшей энергией.

Полная удельная энергия в сечении 1-1 и 2-2 согласно (3.12):

$$E_1 = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}; \; E_2 = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}.$$



К примеру 3.1

Жидкость движется от сечения 1-1 к сечению 2-2, если $E_1 > E_2$, и наоборот.

Для определения E_1 и E_2 нужны сведения о средних скоростях v_1 и v_2, коэффициентах Кориолиса α_1 и α_2 и плотности ρ. Используя формулу расхода (3.5), имеем

$$v_1 = \frac{Q}{S_1}; \;\; S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}; \;\; v_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2} = \frac{4 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0{,}2^2} = 0{,}0955\,\text{м/с}.$$

$$v_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^2} = \frac{4 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0{,}12^2} = 0{,}265\,\text{м/с}.$$

Коэффициент Кориолиса зависит от режима движения и вида потока. В задаче поток напорный, т.е. для круглого сечения

$$\mathrm{Re}_1 = \frac{v_1 d_1}{\nu} = \frac{0{,}0955 \cdot 0{,}2}{10 \cdot 10^{-6}} = 1910 \text{ – ламинарный режим; } \alpha = 2;$$

$$\mathrm{Re}_2 = \frac{v_2 d_2}{\nu} = \frac{0{,}265 \cdot 0{,}12}{10 \cdot 10^{-6}} = 3180 \text{ – турбулентный режим; } \alpha \approx 1.$$

Заданному ν согласно табл.1.1 соответствует жидкость из группы минеральных масел $(\rho = 850\text{-}920\,\text{кг/м}^3)$. Для более точного установления ρ можно воспользоваться справочными данными, например [1, с.314], жидкости с $\nu = 10 \cdot 10^{-6}\,\text{м}^2\text{/с}$ соответствует масло АМГ-10, $\rho = 850\,\text{кг/м}^3$.

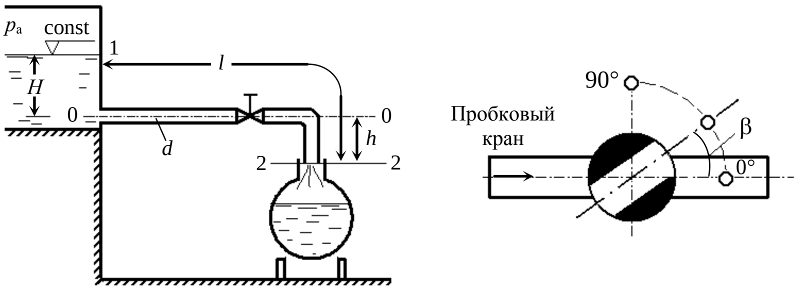
При этом:

$$E_1 = 2 + \frac{0{,}1 \cdot 10^6}{850 \cdot 9{,}81} + \frac{2 \cdot 0{,}0955^2}{2 \cdot 9{,}81} = 2 + 11{,}993 + 0{,}0009 = 13{,}994\,\text{м}.$$

$$E_2 = 6 + \frac{0{,}05 \cdot 10^6}{850 \cdot 9{,}81} + \frac{1 \cdot 0{,}265^2}{2 \cdot 9{,}81} = 6 + 5{,}996 + 0{,}004 = 12\,\text{м}.$$

Так как $E_1 > E_2$, масло движется от сечения 1-1 к сечению 2-2, а местное сопротивление называется внезапным сужением потока.

Пример 3.2. Вода для поливки улиц поступает из накопителя в цистерну емкостью $V = 10$ м^3 за время t по трубопроводу диаметром (условный проход) $d = 50$ мм и длиной $l = 10$ м. На трубопроводе имеется регулируемый пробковый кран с коэффициентом местного



К примеру 3.2

сопротивления $\zeta_{кр}$. При $\zeta_{кр} = 40$ цистерна наполняется за $t_1 = 1$ ч. На какой угол β надо установить рукоятку крана, чтобы вдвое сократить время наполнения цистерны ($t_2 = 0{,}5$ ч)? Принять для трубопровода трубу стальную тянутую, новую; высотой h пренебречь. Уровень воды в накопителе за время заправки цистерны постоянен. Данные для решения:

β, град	0	10	20	30	40	45	50
$\zeta_{кр}$	0	0,4	1,9	6	20	40	102

Решение. Составим уравнение Бернулли по типу (3.12), включающее данные о потерях в местных сопротивлениях. С этой целью проведем плоскость сравнения 0-0 по оси трубы, зададим начальное сечение 1-1 по свободной поверхности воды в накопителе, а сечение 2-2 на выходе из трубы. Тогда:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \left(\lambda \frac{l}{d} + \Sigma\zeta\right)\frac{v_2^2}{2g} + \zeta_{кр}\frac{v_2^2}{2g},$$

где $z_1 = H$; $z_2 = 0$; $p_1 = p_2 = p_а$; $v_1 \approx 0$; $\Sigma\zeta = \zeta_{вх} + \zeta_{кол}$; $\zeta_{вх} = 0{,}5$ – вход из накопителя в трубу; $\zeta_{кол} = 1{,}32$ – для прямого колена с $\alpha = 90°$ [1].

После подстановки названных величин имеем:

$$H = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta_{вх} + \zeta_{кол}\right)\frac{v_2^2}{2g} + \zeta_{кр}\frac{v_2^2}{2g}.$$

Для решения этого уравнения необходимо иметь сведения о средней скорости v_2, коэффициенте Кориолиса α_2 и коэффициенте Дарси λ. Обозначим v_2 через v.

Согласно (3.1)

$$v = \frac{4V}{t_1 \pi d^2} = \frac{4 \cdot 10}{1 \cdot 3600 \cdot \pi \cdot 0{,}05^2} = 1{,}415 \text{ м/с}.$$

Определим режим движения, приняв для воды $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ м^2/с (см. табл.1.5),

$$\mathrm{Re} = \frac{vd}{\nu} = 1{,}415 \cdot 0{,}05 \cdot 10^6 = 70750 > 2320,$$

т.е. режим турбулентный и $\alpha \approx 1$.

Уточним зону сопротивления. Для указанных в задании труб шероховатость $\Delta_э = 0{,}015$ мм (табл.3.1). Тогда $10\frac{d}{\Delta_э} = 10\frac{50}{0{,}015} =$ $= 33330$ и $500\frac{d}{\Delta_э} = 1{,}67 \cdot 10^6$, т.е. Re = 70750 относится к третьей зоне сопротивления, где λ определяется формулой Альтшуля

$$\lambda = 0{,}11\left(\frac{68}{\mathrm{Re}} + \frac{\Delta_э}{d}\right)^{0{,}25} = 0{,}11\left(\frac{68}{70750} + \frac{0{,}015}{50}\right)^{0{,}25} = 0{,}0207.$$

Находим напор в накопителе:

$$H = \frac{v^2}{2g}\left(\alpha_2 + \lambda\frac{l}{d} + \zeta_{вх} + \zeta_{кол} + \zeta_{кр}\right) =$$

$$= \left(\frac{1{,}415^2}{19{,}62}\right)\left(1 + 0{,}0207\left(\frac{10}{0{,}05}\right) + 0{,}5 + 1{,}32 + 40\right) = 4{,}79 \text{ м}.$$

Выразим новое значение

$$\zeta_{кр.нов} = \frac{2gH}{v_{нов}^2} - \left(\alpha_{нов} + \lambda_{нов}\frac{l}{d} + \zeta_{вх} + \zeta_{кол}\right),$$

где $v_{\text{нов}}$ – новая средняя скорость в трубе, $v_{\text{нов}} = 2v = 2 \cdot 1{,}415 = 2{,}93$ м/с.

При этом $\text{Re} = \dfrac{vd}{\nu} = 2{,}93 \cdot 0{,}05 \cdot 10^6 = 141500$, $\alpha_{\text{нов}} \approx 1$.

Полученное Re также относится к третьей области сопротивления:

$$33330 < 141500 < 1{,}67 \cdot 10^6,$$

т.е. $\lambda_{\text{нов}} = 0{,}11\left(\dfrac{68}{141500} + \dfrac{0{,}015}{50}\right)^{0{,}25} = 0{,}0184.$

$$\zeta_{\text{кр.нов}} = \frac{19{,}62 \cdot 4{,}79}{2{,}93^2} - \left(1 + \frac{0{,}0184 \cdot 10}{0{,}05} + 0{,}5 + 1{,}32\right) = 4{,}447 \approx 4{,}45.$$

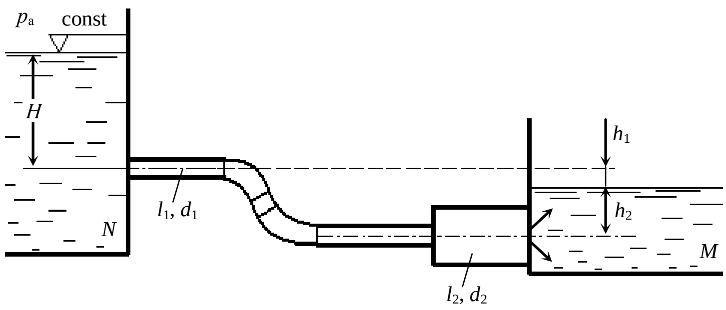
Согласно данным для решения в условии примера на приведенном рисунке $\zeta_{\text{кр}} = 4{,}45$ соответствует примерно углу установки крана $\beta \approx 26^\circ$. Так как начальная величина $\zeta_{\text{кр}} = 40$ соответствовала $\beta \approx 45^\circ$, кран следует приоткрыть. Заметим, что изменение угла β примерно в 1,7 раза вызвало изменение сопротивления крана примерно в 9 раз и сократило время заправки цистерны в 2 раза.

ЗАДАЧИ

Задача 3.1. Жидкость перетекает при H = const из резервуара N в резервуар M по трубопроводу, состоящему из двух участков ($l_1 = 30$ м, $l_2 = 10$ м) разного диаметра (d_1 = 50 мм, d_2 = 100 мм), при одинаковом коэффициенте Дарси ($\lambda_1 = \lambda_2 = 0{,}03$). На трубопроводе имеются два плавных колена ($\zeta_{\text{к}} = 0{,}15$) и внезапное расширение ($\zeta_{\text{вр}}$).

Определить расход жидкости Q при H = 1 м и h_1 = 0,25 м.

Ответ: Q = 2,2 л/с.



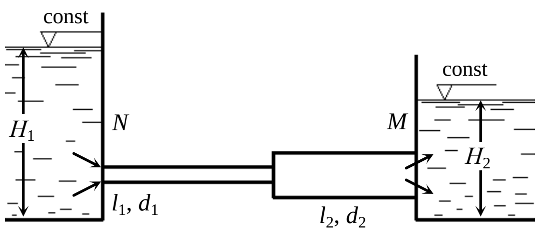
К задаче 3.1

Задача 3.2. Жидкость перетекает из бака N в бак M по трубопроводу, состоящему из двух прямых отрезков ($l_1 = 20$ м, $l_2 = 30$ м) разного диаметра (d_1 = 0,1 м, d_2 = 0,15 м) при одинаковом коэффициенте Дарси ($\lambda_1 = \lambda_2$ = 0,03). Высоты слоя жидкости в баках: H_1 = 4 м, H_2 = 2 м.

1. Определить расход жидкости Q.

2. Построить напорную линию (НЛ) и пьезометрическую (ПЛ) от бака N до бака M.

Ответ: Q = 18 л/с.



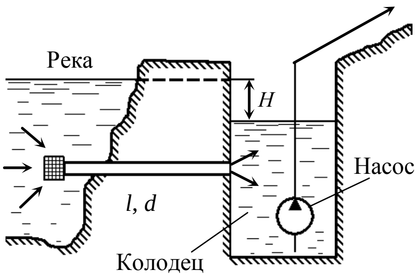
К задаче 3.2

Задача 3.3. Из реки в колодец с расходом Q = 10 л/с поступает вода через приемный фильтр ($\zeta_ф$ = 12) и трубопровод ($l = 120$ м; d = 0,1 м); коэффициент Дарси принять λ = 0,022.

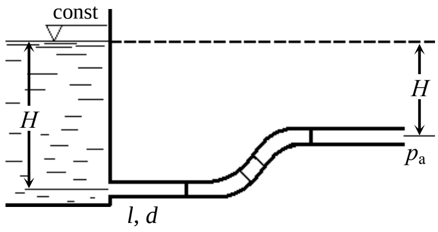
По достижении разности уровней воды в реке и колодце H автоматически включается насос, подающий воду с тем же расходом на производственные нужды.

Определить величину H.

Ответ: H = 3,34 м.



К задаче 3.3



К задаче 3.4

Задача 3.4. Из большого резервуара вода подводится к пункту потребления под напором H по горизонтальному трубопроводу общей длиной $l = 80$ м и одинаковым диаметром d = 0,15 м. Трубопровод смещен в середине пролета в горизонтальной плоскости с помощью двух плавных колен ($\zeta_к$ = 0,44), установленных близко друг к другу.

Определить напор H, если пропускная способность трубопровода Q = 0,05 м^3/с; принять коэффициент Дарси λ = 0,025. Построить для трубопровода напорную линию (НЛ) и пьезометрическую (ПЛ).

Ответ: H = 6,8 м.

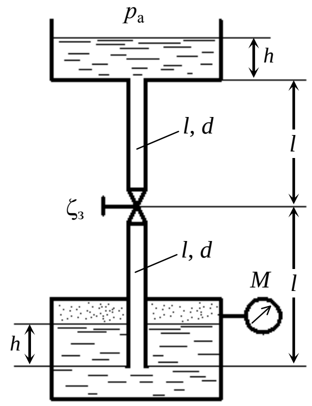
Задача 3.5. В нижнем баке существует манометрическое давление $p_м$ над свободной поверхностью воды. Под действием этого давления вода с расходом Q транспортируется по вертикальному трубопроводу в верхний открытый бак.

Дано: d = 0,025 м, $l = 3$ м, Q = 1,5 л/с. Принять коэффициент Дарси λ = 0,035, режим – турбулентный, $\zeta_з$ = 9,3.

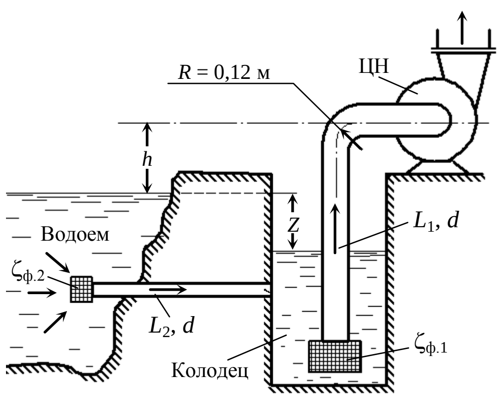
Определить $p_м$.

Ответ: $p_м = 1{,}56$ кгс/см^2.

Задача 3.6. Центробежный насос (ЦН) забирает воду из колодца по всасывающей трубе (ВТ) длиной L_1 = 12 м через приемный клапан с сеткой ($\zeta_{ф1}$ = 6).



К задаче 3.5



К задаче 3.6

Колодец сообщается с большим водоемом самотечной трубой (СТ) с сеткой ($\zeta_{ф2} = 2$); длина СТ $L_2 = 20$ м.

Расход ЦН и пропускная способность СТ одинаковы.

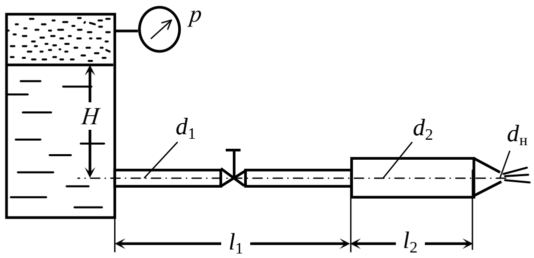
Определить расход Q и разность уровней воды в водоеме и колодце Z, если $d_1 = d_2 = d = 150$ мм, допустимая вакуумметрическая высота ЦН $[H_{вак}] = 6$ м, коэффициент Дарси для ВТ и СТ одинаков ($\lambda = 0{,}03$), а ось ЦН расположена выше уровня воды в водоеме ($h = 2$ м).

Ответ: $Q = 38$ л/с; $Z = 1{,}9$ м.

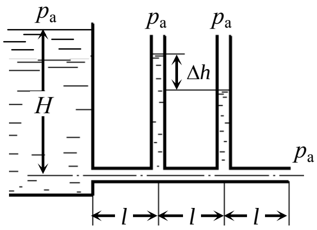
Задача 3.7. Определить расход воды Q, истекающей из конического насадка в атмосферу, если в герметичном резервуаре большой емкости уровень воды постоянен и составляет $H = 5$ м, а на свободной поверхности в резервуаре имеет место избыточное давление $p = 0{,}4$ МПа.

Размеры трубопровода: $l_1 = 10\,м$; $l_2 = 40\,м$; $d_1 = 100$ мм; $d_2 = 200$ мм; $d_н = 80$ мм.

Принять коэффициенты Дарси $\lambda_1 = 0{,}043$; $\lambda_2 = 0{,}034$ и коэффициенты местных сопротивлений: вентиля $\zeta_в = 4$, насадка $\zeta_н = 0{,}06$. Сжатием струи на выходе из насадка пренебречь; учесть другие ука-



К задаче 3.7



К задаче 3.8

занные на схеме местные сопротивления. Построить пьезометрическую линию для трубопровода в целом.

Ответ: Q = 68,2 л/с.

Задача 3.8. Вода вытекает в атмосферу по горизонтальной трубе, на которой установлены два пьезометра.

Диаметр трубы d = 50 мм, длина каждого из трех участков l = 4 м, разность показаний пьезометров Δh = 0,3 м.

Определить расход Q и напор в резервуаре H.

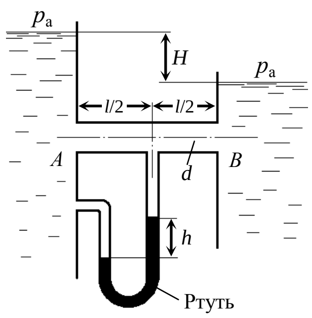
Принять шероховатость трубы $\Delta_э$ = 0,5 мм и кинематическую вязкость воды ν = 1 Ст; местными сопротивлениями пренебречь.

Ответ: Q = 2,85 л/с, H = 0,9 м.

Задача 3.9. Определить режим безнапорного движения воды (число Рейнольдса) в прямоугольном лотке шириной b = 80 см при высоте слоя воды в нем h = 38 см, если расход составляет Q = 5,5 м^3/ч, а температура воды t = 10°С.

Ответ: Re = 3004.

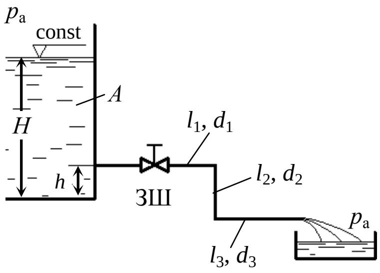
Задача 3.10. Определить расход воды Q, протекающей из бака A в бак B, и располагаемый напор H, если показание ртутного дифманометра, присоединенного одним коленом к баку A, а другим – к середине трубы, составляет h = 440 мм.



К задаче 3.10

Длина трубы $l = 10$ м, диаметр трубы $d = 25$ мм, ее шероховатость $\Delta_э = 0{,}2$ мм. Местные сопротивления учесть.

Ответ: $Q = 1{,}8$ л/с, $H \approx 10{,}1$ м.



К задаче 3.11

Задача 3.11. Из накопителя A с постоянным уровнем периодически и кратковременно выпускают часть воды по самотечному трубопроводу с расходом $Q = 126$ м^3/ч.

Трубопровод стальной, эксплуатируется несколько лет и имеет следующие размеры:

- верхний горизонтальный участок с шиберной задвижкой (ЗШ) – $l_1 = 10$ м, $d_1 = 100$ мм;
- вертикальный участок – $l_2 = 5$ м, $d_2 = d_1$;
- нижний горизонтальный участок – $l_3 = 30$ м, $d_3 = 150$ мм.

Выпуск воды производят при полностью открытой ЗШ. Резерв высоты h в накопителе для твердого осадка равен 0,27 м; участки соединены между собой прямыми коленами с $\alpha = 90°$.

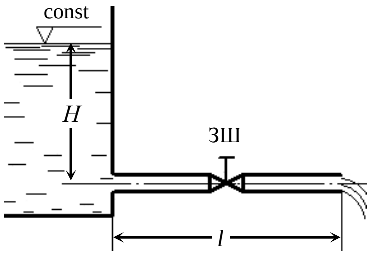
Определить высоту H слоя воды в накопителе во время выпуска. Определение зоны сопротивления обязательно.

Ответ: $H \approx 2$ м.

Задача 3.12. Вода при температуре $t = 10°$ С вытекает по горизонтальному трубопроводу в атмосферу при постоянном напоре $H = 1{,}8$ м.

Определить расход воды Q, если:

- внутренний диаметр трубы $d = 6{,}2$ см;
- задвижка шиберная (ЗШ) полностью открыта;
- труба стальная, бывшая в употреблении;



К задаче 3.12

• длина трубопровода $l = 10$ м.

Ответ: $Q = 7{,}24\cdot10^{-3}$ м^3/с.

Задача 3.13. По наклонной прямой трубе длиной $L = 2$ км постоянного диаметра $d = 100$ мм перекачивают нефть ($\rho = 950$ кг/м^3, $\nu = 25\cdot10^{-6}$ м^2/с) с расходом $Q = 5$ л/с. Избыточное давление в начале трубы $p_1 = 0{,}3$ МПа.

Определить угол α наклона трубы к горизонту, если в конце трубы давление атмосферное. Изобразить трубу по итогам расчета.

Ответ: $\alpha = 24'$.

Задача 3.14. По трубе внутренним диаметром $d = 100$ мм перекачивают нефть плотностью $\rho = 860$ кг/м^3 со средней скоростью $v = 1{,}1$ м/с.

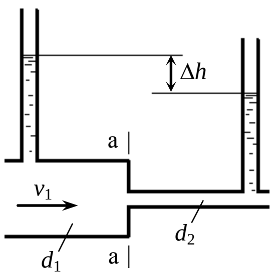
Определить суточную пропускную способность трубы (массовый расход $Q_т$).

Ответ: $Q_т = 641{,}6$ т/сут.

Задача 3.15. Определить часовой расход Q воды при ее движении безнапорно по желобу прямоугольной формы (ширина желоба $a = 40$ см, высота слоя воды $h = 18$ см) с числом Рейнольдса $\mathrm{Re} = 20000$.

Ответ: $Q = 13{,}7$ м^3/ч.

Задача 3.16. Горизонтальная труба диаметром $d_1 = 20$ см в сечении а-а резко переходит в трубу диаметром $d_2 = 10$ см.

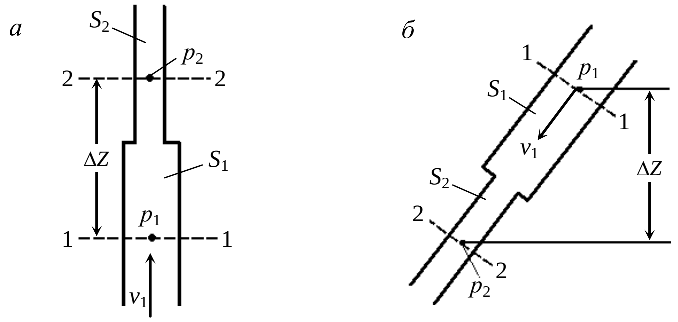


К задаче 3.16

Пренебрегая сопротивлениями и считая режим движения жидкости турбулентным, определить разность Δh_1 уровней жидкости в пьезометрах, если в широком сечении жидкость движется со средней скоростью $v = 0{,}8$ м/с.

Как изменится Δh, если учесть местное сопротивление (резкое сужение)?

Ответ: $\Delta h_1 \approx 0{,}49$ м; $\Delta h_2 = 0{,}685$ м.



К задаче 3.17

Задача 3.17. Определить манометрическое давление в сечении 1-1 (p_1) трубопровода, по которому движется жидкость плотностью $\rho = 880$ кг/м^3, если средняя скорость в сечении 1-1 $v_1 = 1{,}1$ м/с и площадь живого сечения 2-2 (S_2) в 2,5 раза меньше S_1.

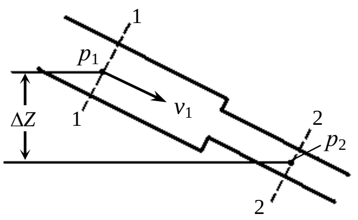
Расчеты выполнить для двух случаев, показанных на рисунке. Принять манометрическое давление в сечении 2-2 $p_2 = 2{\cdot}10^5$ Па, разность геодезических отметок сечений $\Delta Z = 8{,}7$ м, жидкость считать идеальной.

Ответ: $p_1 = 2{,}78{\cdot}10^5$ Па (рисунок, *а*); $p_1 = 1{,}28{\cdot}10^5$ Па (рисунок, *б*).

Задача 3.18. Определить среднюю скорость движения воды в сечении 2-2 v_2, если $v_1 = 1{,}2$ м/с, манометрическое давление $p_1 = 1{,}2$ кгс/см^2 и $p_2 = 1{,}1$ кгс/см^2, а разность геодезических отметок сечений 1-1 и 2-2 составляет $\Delta Z = 3$ м.

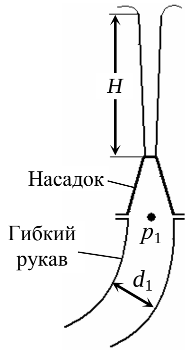
Принять режим движения турбулентным, потери напора на преодоление всех гидравлических сопротивлений между сечениями 1-1 и 2-2 $\Sigma\Delta h_{1\text{-}2} = 1{,}4$ м.

Ответ: $v_2 = 7{,}25$ м/с.



К задачам 3.18 и 3.26

Задача 3.19. Пожарный рукав диаметром $d_1 = 76$ мм заканчивается коническим сходящимся насадком (брандспойтом), суммарные потери



К задаче 3.19

напора в котором составляют $\Delta h = 0{,}3$ м при расходе $Q = 8 \cdot 10^{-3}$ м^3/с.

Определить манометрическое давление p_1 на входе в насадок, если струя воды поднялась на высоту $H = 26$ м. Сопротивлением воздуха пренебречь.

Ответ: $p_1 = 2{,}57 \cdot 10^5$ Па.

Задача 3.20. На какую высоту h может подняться вода из открытого резервуара A по трубке, присоединенной к узкому сечению S_2 трубопровода, если средняя скорость воды в широком сечении $v_1 = 1{,}2$ м/с, а манометрическое давление $p_1 = 12000$ Па?

При этом площадь широкого сечения S_1 в пять раз больше S_2. Потерями энергии пренебречь.

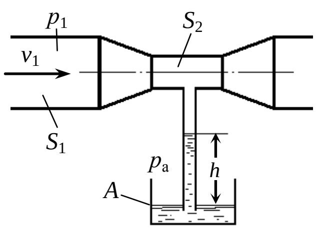
Ответ: $h = 0{,}538$ м.

Задача 3.21. По трубопроводу, имеющему сужение, движется вода с расходом $Q = 22$ л/с. Диаметр трубопровода в широком сечении $d_1 = 200$ мм, манометрическое давление там же $p_1 = 12000$ Па.

Каким должен быть диаметр d_2 узкой части трубопровода, чтобы обеспечить подъем воды из открытого резервуара A на высоту $h = 3{,}1$ м? Потерями напора пренебречь.

Ответ $d_2 \approx 55{,}1$ мм.

Задача 3.22. По трубопроводу постоянного сечения длиной $L = 56{,}4$ км перекачивают нефть плотностью $\rho = 860$ кг/м^3. Начальная отметка трубопровода выше конечной на 120 м.



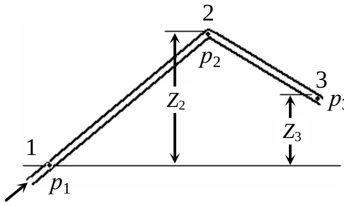
К задачам 3.20 и 3.21

Определить величину гидравлического уклона I, если манометрическое давление в начале трубопровода $p_1 = 3 \cdot 10^6$ Па, а в конце – атмосферное $p_2 = p_а$.

Ответ: $I = 0{,}0084$.

Задача 3.23. Определить манометрическое давление p_2 в точке 2 водопровода постоянного диаметра, имеющего общую длину $L_{1\text{-}2}$ = 12 км и $L_{2\text{-}3}$ = 4,2 км, если в точке 3 давление $p_3 = p_a$, а в точке 1 манометрическое давление p_1 = 1,5 МПа. Геодезические отметки точек: $z_1 = 0$, $z_2 = 64$ м, $z_3 = 42$ м.

Ответ: p_2 = 0,165 МПа.



К задаче 3.23

Задача 3.24. Водомер Вентури имеет диаметры d_1 = 200 мм, d_2 = 100 мм. Определить расход воды Q, если показание ртутного дифманометра соответствует Δh = 4,2 см. Принять коэффициент Кориолиса $\alpha = 1{,}06$ и коэффициент расхода, учитывающий потери энергии в водомере $\mu = 0{,}96$.

Ответ: $Q \approx 24{,}4 \cdot 10^{-3}$ м^3/с.

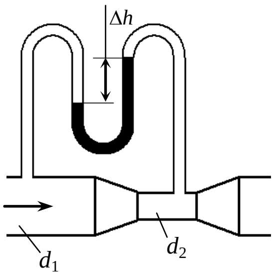
Задача 3.25. На горизонтальном участке трубопровода внутренним диаметром d_1 = 100 мм установлен водомер Вентури с диаметром суженной части d_2 = 50 мм.

Определить, пренебрегая потерями энергии, расход воды Q по показанию ртутного дифманометра Δh = 3,8 см, подключенного к широкому и узкому сечению водомера.

Установить область сопротивления широкого и узкого участков водомера, если эквивалентная шероховатость $\Delta_э$ = 0,1 мм.

Ответ: Q = 6,03 л/с.

Задача 3.26. По трубопроводу диаметром d_1 = 200 мм с резким сужением до диаметра d_2 = 100 мм перекачивают масло плотностью $\rho_м$ = 750 кг/м^3. Избыточное давление в широкой трубе p_1 = 176,6 кПа, а в узкой трубе p_2 = 147,2 кПа. Геодезическая отметка первого сечения относительно второго z_1 = +1 м.



К задачам 3.24 и 3.25

Определить потери напора $\Delta h_{1\text{-}2}$ на участке 1-2 при расходе масла $Q = 31{,}4 \cdot 10^{-3}$ м^3/с.

Определить полную энергию потока в первом сечении (гидродинамический напор) $H_{гд}$ и кинетическую H_v.

Ответ: $\Delta h_{1\text{-}2} = 3{,}76$ м; $H_{гд} = 22{,}23$ м; $H_v = 0{,}051$ м.

Задача 3.27. Трубопровод, имеющий в сечении 1 диаметр $d_1 = 150$ мм, постепенно расширяется до диаметра $d_2 = 400$ мм в сечении 2. Центр тяжести сечения 2 расположен выше центра тяжести сечения 1 на величину $z_2 = 2$ м.

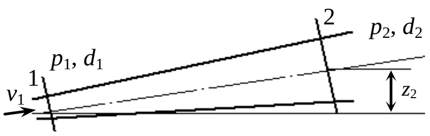
Определить разность полных напоров $(H_1 - H_2)$ между сечениями 1 и 2, если расход воды по трубопроводу составляет $Q = 106$ л/с, а потери энергии на трение равны 20 % от потерь при внезапном расширении потока.

Ответ: $H_1 - H_2 = 0{,}472$ м.

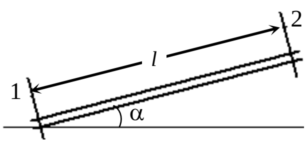
Задача 3.28. По прямому трубопроводу постоянного диаметра $d = 250$ мм, с шероховатостью $\Delta_э = 0{,}04$ мм, длиной $l = 250$ м, наклоненному к горизонту под углом $\alpha = 0°55'$, подается вода с расходом $Q = 49{,}1 \cdot 10^{-3}$ м^3/с.

Определить:

- давление воды p_2 в сечении 2, если давление в сечении 1 составляет $p_1 = 196{,}2$ кПа, а жидкость движется от сечения 1 к сечению 2;
- давление p_2 при $p_1 = 196{,}2$ кПа, если жидкость движется от сечения 2 к сечению 1.



К задаче 3.27



К задаче 3.28

При расчетах проверка области сопротивления обязательна.

Ответ: $p_2 = 149031$ Па; $p_2 = 164889$ Па.

Задача 3.29. Вертикальная коническая труба длиной $l = 4$ м имеет нижний диаметр

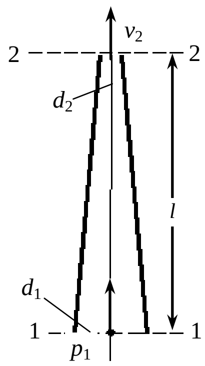
d_1 = 500 мм и верхний d_2 = 100 мм; из сечения 2-2 жидкость истекает в атмосферу со скоростью v_2 = 10 м/с.

Определить:

• избыточное давление на входе воды в трубу p_1;

• полную удельную энергию потока (с учетом атмосферного давления $p_а$) на входе в трубу $H_{гд.1}$ и на выходе $H_{гд.2}$ относительно плоскости сравнения, проведенной через сечение 1-1.

Ответ: p_1 = 93084 Па; $H_{гд.1}$ = 19,5 м; $H_{гд.2}$ = 19,1 м.



К задаче 3.29

Задача 3.30. Определить гидравлический уклон I для напорного потока воды в трубе постоянного диаметра d = 0,1 м при расходе $Q = 5{\cdot}10^{-3}$ м^3/с, если эквивалентная шероховатость трубы $\Delta_э$ = 0,02 мм.

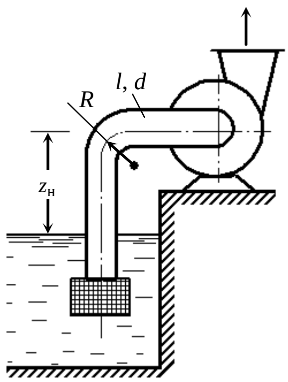
Ответ: I = 0,0043.

Задача 3.31. По новому трубопроводу постоянного диаметра d = 200 мм длиной l = 1,6 км перекачивают в сутки 2794 т тяжелой нефти (ρ = 924 кг/м^3, ν = 1,4 Ст). Определить потери напора Δh по длине трубопровода, если он выполнен из стальных бесшовных труб.

Ответ: $\Delta h \approx$ 8,36 м.

Задача 3.32. Определить допустимую высоту установки центробежного насоса над уровнем воды в колодце $z_н$ при следующих данных: вакуумметрическая высота всасывания насоса $h_{вак}$ = 4,8 м; диаметр всасывающей трубы d = 200 мм, ее длина l = 16 м; подача насоса Q = 173 м^3/ч.

На всасывающем трубопроводе имеются местные сопротивления: фильтрующая сетка с обратным клапаном $\zeta_с$ и



К задаче 3.32

два плавных колена ($\zeta_к$) с поворотом на 90° и радиусом закругления R = 200 мм.

При расчетах установление области сопротивления обязательно. Эквивалентную шероховатость трубы принять $\Delta_э$ = 0,1 мм.

Ответ: $z_н$ < 3,9 м.

Задача 3.33. Определить диаметр нефтепровода d и режим движения Re нефти (ρ = 885 кг/м^3, ν = 0,25 Ст), если скорость ее движения $\vartheta = 1{,}2 \text{м/с}$ при перекачке 600 т/сут и работе насоса по перекачке 8 ч/сут.

Ответ: d = 158 мм; Re ≈ 7600.

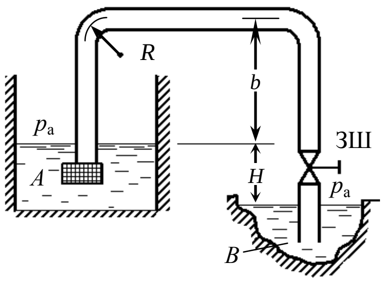
Задача 3.34. Из накопителя A в водоем B вода подается при температуре t = 30° С по сифонному трубопроводу с расходом Q = 50 л/с при разности уровней в водоемах H = 2 м.

Трубопровод имеет местные сопротивления: сетчатый фильтр с обратным клапаном ($\zeta_ф \approx 5{,}5$), два плавных колена с отношением r/R = 0,2 [1], шиберную задвижку с a/D = 0,5 [1] и выход в большую емкость; эквивалентная шероховатость $\Delta_э$ = 0,065 мм.

Определить диаметр трубопровода d.

При решении использовать графический способ или метод последовательных приближений (итераций). Для определения параметров жидкости использовать рекомендации раздела 1.

Ответ: d = 192 мм.



К задачам 3.34 и 3.35

Задача 3.35. Для условий задачи 3.34 проверить работу системы на отсутствие кавитации в опасном сечении (область второго пологого колена), до которого длина трубопровода составляет l = 40 м; высота b = 2м. Принять давление насыщенных паров воды (абсолютное) при t = 30° С $p_{нп}$ = 4214 Па и $p_а$ = 98100 Па.

Ответ: $p_{min.абс}$ = 65,3 кПа > $p_{нп}$, т.е. кавитации нет.

Задача 3.36. При какой скорости v осуществляется (теоретически) переход ламинарного режима в турбулентный, если жидкость движется в трубе диаметром d = 50 мм, а ее свойства соответствуют данным табл.1.5: бензин; вода; спирт; глицерин.

Ответ: v_1 = 0,028 м/с; v_2 = 0,047 м/с; v_3 = 0,070 м/с; v_4 = 40,37 м/с.

Задача 3.37. Определить диаметр d трубы длиной l = 10 м для прокачки по ней нефти (ρ = 885 кг/м^3; $\nu = 25 \cdot 10^{-6}$ м^2/с) с массовым расходом $Q_т$ = 600 т/сут при времени работы насоса T = 8 ч/сут,, если потери напора составляют Δh = 0,03 м, а режим движения соответствует области гидравлически гладких труб.

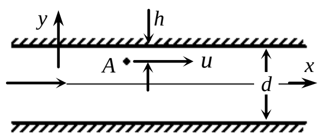
Ответ: d = 224 мм.

Задача 3.38. Определить местную скорость v в точке A, отстоящей от стенки трубы на расстояние h = 12 мм, если движение жидкости ламинарное, диаметр трубы d = 0,1 м, расход жидкости Q = 18,5 л/с.

Ответ: v = 1,99 см/с.

Задача 3.39. В трубе диаметром d = 0,2 м на расстоянии h = 48 мм от стенки местная скорость масла u = 6,8 см/с. Определить суточный объемный расход Q масла, считая режим движения ламинарным.

Ответ: Q = 126 м^3/сут.

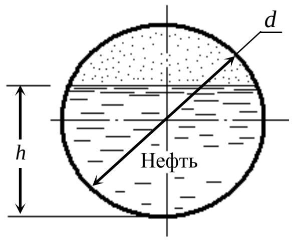


К задачам 3.38 и 3.39

Задача 3.40. В самотечном трубопроводе диаметром d = 0,1 м течет нефть (условная вязкость 7,2° ВУ, ρ = 860 кг/м^3) с массовым расходом $Q_т$ = 22 т/ч.

Определить режим движения нефти, если высота ее слоя в трубе h = 80 мм.

Ответ: Re = 2485.



К задаче 3.40

Задача 3.41. Определить потерю напора Δh в трубопроводе длиной $l = 500$ м и диаметром $d = 0{,}15$ м при перекачке тяжелой нефти ($\rho = 950$ кг/м^3; $\mu = 1{,}33$ П) с расходом $Q = 20$ л/с.

Ответ: $\Delta h = 11{,}49$ м.

Задача 3.42. Два резервуара с водой соединены между собой новой стальной сварной трубой с постоянным диаметром $d = 50$ мм, длиной $l = 120$ м.

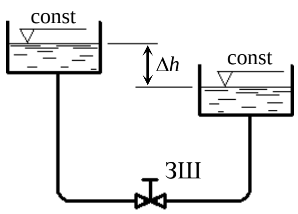
Определить разность уровней воды Δh при постоянных отметках этих уровней во время движения воды по трубе при открытой задвижке ЗШ [1]; расход $Q = 3$ л/с. На трубе имеются местные сопротивления: задвижка, вход в трубу и выход из нее и два плавных колена с $r/R = 0{,}5$.

Установление области сопротивления обязательно.

Ответ: $\Delta h \approx 7{,}55$ м.

Задача 3.43. По трубопроводу диаметром $D = 0{,}1$ м, шероховатостью $\Delta = 0{,}15$ мм и длиной $l = 2850$ м перекачивают жидкость с кинематическим коэффициентом вязкости $\nu = 0{,}03$ Ст при расходе $Q = 9{,}5$ л/с. Определить потерю напора Δh и приведенную длину трубопровода $L_{пр}$, если на нем имеются четыре полностью открытые шиберные задвижки, обратный клапан и диафрагма с диаметром отверстия $d = 56$ мм.

Ответ: $\Delta h \approx 56$ м; $L_{пр} \approx 2885$ м.



К задачам 3.42 и 3.45

Задача 3.44. Определить критический расход (соответствующий теоретическому переходу ламинарного режима движения жидкости к турбулентному) воды $Q_в$ и керосина $Q_к$, $\nu_к = 0{,}025$ Ст при безнапорном движении жидкости по прямоугольному каналу шириной $b = 1{,}2$ м при слое жидкости в нем высотой $h = 0{,}42$ м.

Ответ: $Q = 1{,}8$ л/с; $Q = 4{,}5$ л/с.

Задача 3.45. Определить диаметр трубы d, имеющей шероховатость $\Delta = 0{,}1$ мм и служащей для перепуска воды с расходом $Q = 30$ л/с из одного резервуара в другой при постоянной разности уровней в них $\Delta h = 5$ м и длине трубы $L = 120$ м.

Местными сопротивлениями пренебречь; использовать способ последовательных приближений.

Ответ: $d \approx 128$ мм.

Задача 3.46. Гидравлический уклон при движении воды по трубе с шероховатостью $\Delta = 0{,}1$ мм составляет $I = 0{,}01$, средняя скорость потока $v = 1{,}4$ м/с.

Определить диаметр трубы d и расход воды Q.

Ответ: $d = 185$ мм; $Q = 37{,}7$ л/с.

Задача 3.47. Для потока жидкости прямоугольного сечения с площадью живого сечения $S = 1{,}2$ м^2 найти такие размеры ширины потока b и высоты слоя жидкости h, чтобы гидравлический радиус $R_г$ потока был наибольший.

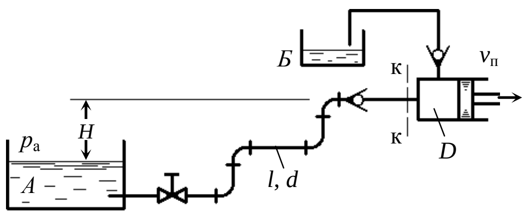
Ответ: $h = 0{,}775$ м; $b = 1{,}549$ м; $R_{г.max} = 0{,}387$ м.

Задача 3.48. По шахтной вентиляционной трубе диаметром $d = 500$ мм, шероховатостью $\Delta = 0{,}2$ мм проветривают тупиковую выработку длиной $l = 120$ м Определить избыточное давление p_1, которое должен развить вентилятор при расходе воздуха ($\rho = 1{,}186$ кг/м^3, $\nu = 15{,}7 \cdot 10^{-6}$ м^2/с) в трубе $Q = 220$ м^3/мин, если на выходе из трубы давление атмосферное.

Ответ: $p_1 > 84$ Па.

Задача 3.49. Из бака A в бак $Б$ следует перекачать поршневым насосом масло АМГ-10 ($\rho = 850$ кг/м^3; $\nu = 10$ сСт).

Определить допустимую по условиям отсутствия кавитации



К задаче 3.49

высоту [H] расположения оси насоса над свободной поверхностью масла в баке *A*. Длина всасывающего трубопровода l = 6 м; скорость поршня $v_п$ = 0,8 м/с; диаметр поршня D = 70 мм, труб d = 32 мм; шероховатость труб Δ = 0,015 мм.

На трубопроводе имеются местные сопротивления: вход в трубу при выступающей в бак *A* трубе ($\zeta_{вх}$), пробковый кран при $\beta = 0°$ ($\zeta_{кр}$, см. пример 3.2), две пары сочлененных по схеме (рис.3.2) плавных (R/r = 2) колен ($\zeta_к$) [1] и обратный клапан ($\zeta_{ок}$ = 2).

За опасное принять сечение к-к. Давление насыщенных паров $p_{нп}$ = 400 Па. Атмосферное давление $p_а$ = 98100 Па.

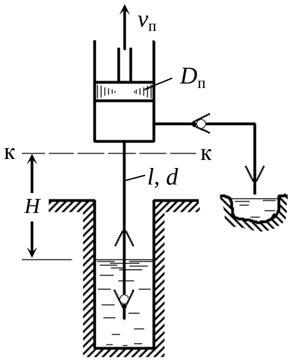
Ответ: [H] < 2,77 м.

Задача 3.50. Для осушения скважины используют поршневой насос со скоростью поршня $v_п$ = 2 м/мин.

Проверить сечение к-к всасывающего вертикального трубопровода длиной l = 9,3 м, диаметром d = 32 мм на наличие кавитации, если воду следует поднять на высоту H = 9 м при температуре t = 10 °С.

На трубе, кроме обычных сопротивлений, имеется обратный клапан ($\zeta_{ок}$ = 3). Диаметр поршня D = 70 мм.

Для определения параметров жидкости использовать рекомендации раздела 1.



К задаче 3.50

Давление насыщенных паров воды при t = 10 °С $p_{нп}$ = 1200 Па. Принять атмосферное давление $p_а$ = 98100 Па.

Ответ: $p_{к\text{-}к}$ = 8550 Па. Кавитации нет.

Задача 3.51. От насоса *N* вода подается с давлением $p_н$ попеременно к гидромониторам M_1 и M_2, расположенным на разных горизонтах ($z_1 = z_2$ = 50 м). Один гидромонитор потребляет расход Q = 360 м^3/ч. При этом потери давления в проточном тракте гидромонитора составляют $\Delta p_м$ = 1 ат.

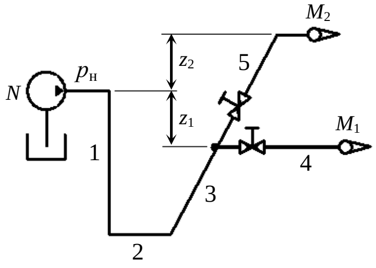
Определить давление насоса $p_{1н}$ и $p_{2н}$ при следующих размерах трубопровода:

Участок трубопровода	1	2	3	4	5
Длина l, м	200	1000	100	150	150
Диаметр d, мм	200	200	200	150	150

Принять шероховатость труб Δ = 0,22 мм. Трубопровод отнести к категории длинных.

Ответ: $p_{1н} \approx 123$ ат; $p_{2н} \approx 133$ ат.

Задача 3.52. В подготовительном забое вместо гидромониторов M_1 или M_2 применяют углепроходческий комбайн, на который подают воду (для организации самотечного гидротранспорта угля от забоя) с давлением p_2 = 1 МПа; при этом в магистрали существует давление p_1 = 12 МПа. Для снижения давления и расхода Q в линии на участке № 4 устанавливают диафрагму с диаметром отверстия d.



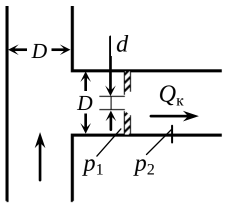
К задачам 3.51, 3.52, 3.53

Определить диаметр диафрагмы d, если расход воды на комбайн Q = 0,05 м^3/с, а диаметр труб магистрали D = 0,1 м.

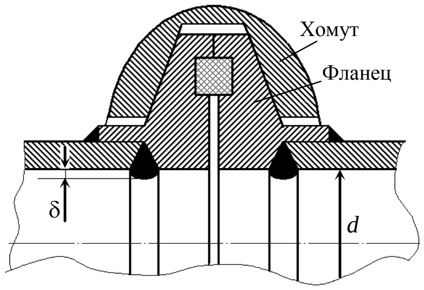
Ответ: d = 26 мм.

Задача 3.53. При гидравлической добыче угля для подвода высоконапорной воды к гидромониторам используют для стыковки отрезков труб длиной l = 3 м быстроразъемные хомутовые соединения (БС), фланцы которых приварены с двух концов к каждому отрезку электродуговой сваркой с выступающей внутрь трубы высотой сварного шва на величину $\delta \approx$ 1,5-2 мм.

Во сколько раз возрастут потери напора в трубе со сварными швами $\Delta h'$ по сравнению с



К задаче 3.52



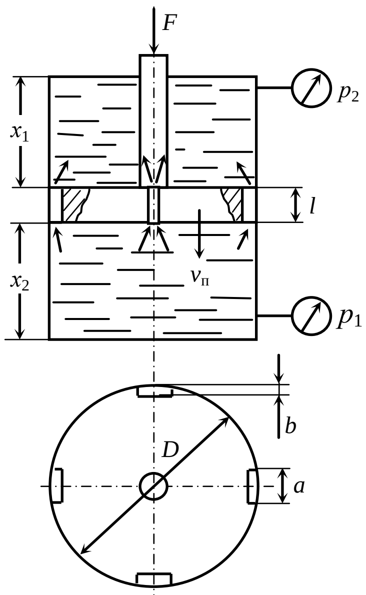
К задаче 3.53

той же трубой, но без сварных швов Δh, если диаметр трубы d = 200 мм, а сопротивление труб без стыков при квадратичном законе сопротивления λ = 0,0207?

Ответ: $\Delta h'/\Delta h$ = 1,058-1,092.

Задача 3.54. Поршень с четырьмя щелями перемещается под нагрузкой F вниз. Трансформаторное масло [1, с.314] из нижней полости цилиндра перетекает по щелям в его верхнюю полость.

Определить расход Q через щели поршня, режим движения масла в щелях, скорость $v_п$ движения поршня вниз и силу F.



К задаче 3.54

Трением поршня и штока о стенки цилиндра и уровнями масла x_1, x_2 пренебречь. Для определения перепада давления на щели использовать формулу

$$\Delta p_{щ} = \frac{32 l v \mu}{d^2},$$

где μ – динамический коэффициент вязкости; d – характерный размер сечения щели.

Дано: ρ = 884 кг/м^3; p_1 = = 0,1 МПа; p_2 = 0; l = 150 мм; a = 3 мм; b = 1,5 мм; D = 40 мм.

Ответ: Q = 10,6 л/мин; $v_п$ = 0,14 м/с; ламинарный режим; F = 12,8 кгс.

РАЗДЕЛ 4

ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ И СЛУЧАИ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Истечение – процесс преобразования полной энергии жидкости в кинетическую энергию струи.

В процессе истечения участвуют различные *струеформирующие устройства* (СФУ): отверстия, насадки.

Истечение жидкости может быть при постоянном исходном давлении (или напоре) и переменном в воздух (*свободная струя*) и в жидкость (*затопленная струя*).

В горном деле струи используют для тушения подземных и наземных пожаров, для разрушения угля (гидроотбойка), при гидровскрышных работах на карьерах, в элементах объемного и гидротурбинного привода горных машин.

Основными параметрами истечения являются скорость истечения v и расход Q:

$$v = \varphi\sqrt{2gH} = \varphi\sqrt{2p/\rho}; \qquad (4.1)$$

$$Q = \mu S\sqrt{2gH} = \mu S\sqrt{2p/\rho}. \qquad (4.2)$$

где φ – коэффициент скорости, или КПД СФУ; в общем случае

$$\varphi = 1/\sqrt{\alpha + \lambda l/d + \sum\zeta} < 1; \qquad (4.3)$$

α – коэффициент Кориолиса (для сжатого сечения струи $\alpha = 1$); λ – коэффициент Дарси; l – длина участка контакта струи со стенками насадка, для отверстия в тонкой стенке $l = 0$; для насадков $\lambda l/d$ величина весьма малая и ею пренебрегают; ζ – коэффициент местных сопротивлений; H – напор перед СФУ; для затопленных струй вместо H следует учитывать $\Delta H = H_1 - H_2$; H_1, H_2 – напор до и после СФУ; S – площадь выходного отверстия СФУ; μ – *коэффициент расхода*,

$$\mu = \varepsilon\varphi < 1; \tag{4.4}$$

ε – *коэффициент сжатия* струи,

$$\varepsilon = S_c / S = (d_c / d)^2 \le 1; \tag{4.5}$$

S_c – площадь сжатого сечения струи после выхода из СФУ (рис.4.1).

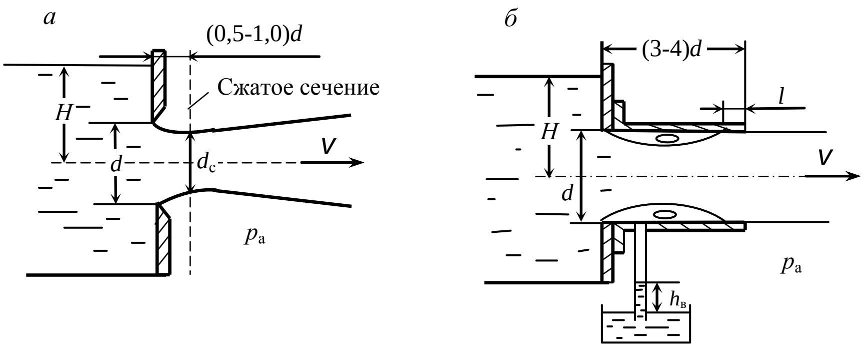


Рис.4.1

При истечении под уровень коэффициент скорости φ соответствует в общем случае выражению:

$$\varphi = 1 / \sqrt{\lambda l / d + \sum \zeta}. \tag{4.6}$$

На рис.4.1 показано истечение жидкости из отверстия в тонкой стенке (*а*) и из внешнего цилиндрического насадка (*б*).

В табл.4.1 приведены коэффициенты истечения для разных СФУ при $\mathrm{Re} > 10^4$ и совершенном сжатии струи.

Таблица 4.1

Тип СФУ	Значения коэффициентов			Суммарное сопротивление ζ
	сжатия ε	расхода μ	скорости φ	
1. Отверстие в тонкой стенке (с острой кромкой)	0,64	0,62	0,97	0,06
2. Внешний цилиндрический насадок				
а) с острой входной кромкой при длине $l = (3 - 4)d$	1	0,82	0,82	0,50
б) с коническим входом (коноцилиндрический)	1	0,90	0,90	0,23
3. Внутренний цилиндрический насадок	1	0,71	0,71	1,00
4. Коноидальный насадок (сопло)	1	0,97	0,97	0,06
5. Конический сходящийся насадок при угле конусности $\theta \approx 13°$	0,98	0,94	0,96	0,07
6. Конический расходящийся насадок при угле конусности $\theta \approx 5$-$7°$	1	0,45 – 0,50	0,45 – 0,50	$4 \div 3$

Примечание. При $Re < 10^4$ следует использовать другие справочные данные, например [5].

Насадки служат для изменения расхода по сравнению с расходом через отверстие: насадки 2-5 увеличивают расход; 6 – уменьшает.

Насадки 2б, 4, 5 позволяют получить компактную струю со сравнительно большой дальностью полета. Насадки типа 2б, 5 применяют при пожаротушении, гидроотбойке угля и гидровскрышных работах.

Если истечение происходит через короткую трубу, напоминающую цилиндрический внешний насадок, но имеющую $l/d > 4$,

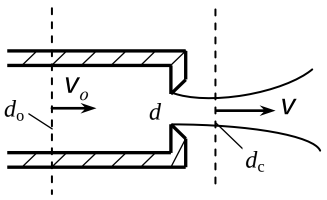


Рис.4.2

следует использовать формулы (4.3) и (4.6) с определением λ (см. раздел 3).

При истечении маловязких жидкостей из круглых отверстий, расположенных в центре торцевой стенки цилиндрического резервуара (рис.4.2), коэффициент расхода можно определить по формуле для несовершенного сжатия [5]

$$\mu = \varphi[\varepsilon + 0{,}37(d / d_o)^4]. \qquad (4.7)$$

При истечении под уровень (затопленная струя (рис.4.3) в формулах (4.1) и (4.2) расчетный напор H определяется с учетом разности напоров $\Delta H = H_1 - H_2$ и разности абсолютных давлений $\Delta p = p_1 - p_2$, т.е.

$$H = \Delta H + \Delta p / \rho g. \qquad (4.8)$$

Большим считается отверстие, вертикальный размер которого (a или d) превышает 0,1 Н. Для незатопленного большого отверстия в вертикальной стенке расход определяется по формулам:

- для прямоугольного отверстия

$$Q = (2/3)\mu b\sqrt{2g}\left(\sqrt{H_2^3} - \sqrt{H_1^3}\right); \qquad (4.9)$$

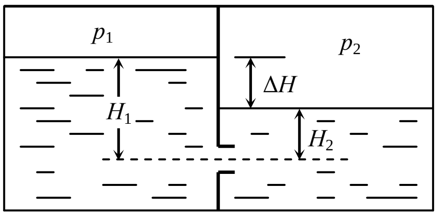


Рис.4.3

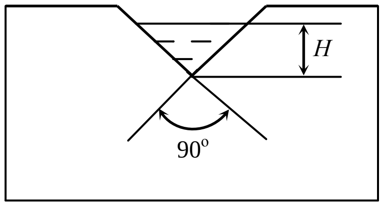


Рис.4.4

• для круглого отверстия

$$Q = \mu S\sqrt{2gH}[1 - 7{,}81 \cdot 10^{-3}(d / H)^2], \qquad (4.10)$$

где μ – коэффициент расхода для отверстия по табл.4.1; H – напор в центре тяжести отверстия; d – диаметр круглого отверстия; a и b – соответственно высота и ширина прямоугольного отверстия; S – площадь отверстия; H_1 и H_2 – напор соответственно у верхнего и нижнего края прямоугольного отверстия.

Для треугольного водослива (рис.4.4) расход можно определить по приближенной формуле

$$Q \approx 1{,}4\sqrt{H^5}\ . \qquad (4.11)$$

При движении жидкости по цилиндрическому наружному насадку (рис.4.1, *б*) поток сначала сужается до размеров сжатого сечения, а затем расширяется, входя второй раз в контакт со стенками насадка. При этом образуется в области сжатого сечения замкнутое пространство с вакуумметрическим давлением, величину которого можно определить по формуле [7]:

$$p_{\text{вак}} = \rho g h_{\text{в}} = 2\varphi^2(1/\varepsilon - 1)\rho g H, \qquad (4.12)$$

где φ – коэффициент скорости; ε – коэффициент сжатия струи внутри насадка (см. табл. 4.1).

Совершенное сжатие будет при достаточном удалении отверстия от стенок резервуара (рис.4.5), а именно: для круглого отверстия при $l \geq 3d$, для прямоугольного $l_1 \geq 3a$ и $l_2 \geq 3b$.

Неполным сжатием считают такую ситуацию, когда часть П′ общего периметра П отверстия примыкает к какой-либо стенке; для отверстия 1 по рис.4.5 П′ = $a + b$, П = 2a + 2b; для отверстия 2 П′ = b, П = $2a + 2b$.

При неполном сжатии коэффициент расхода может определяться по формуле [8]

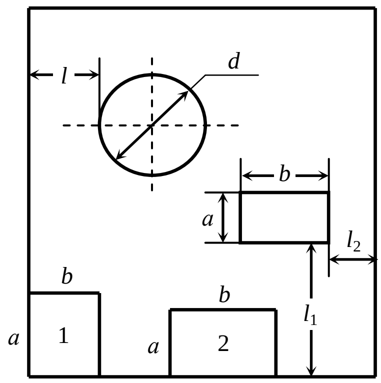


Рис.4.5

$$\mu_{нп} \approx \mu(1 + 0{,}14\Pi'/\Pi), \qquad (4.13)$$

где μ – коэффициент расхода при совершенном сжатии, для малого круглого отверстия в тонкой стенке μ соответствует табл.4.1.

Приближенно для прямоугольных отверстий в тонкой стенке ($a \times b$) для маловязких жидкостей можно принимать $\mu \approx 0{,}6 - 0{,}61$; $\varphi \approx 0{,}97$; $\varepsilon \approx 0{,}62 - 0{,}63$.

При движении жидкостной струи в воздухе важной характеристикой является дальность ее полета (дальность боя).

Свободная струя, покидающая насадок со скоростью v, теоретически может подняться вертикально вверх на высоту $h_т$, будучи компактной:

$$h_т = v^2 / 2g.. \qquad (4.14)$$

В действительности раздробленная на капли часть струи может достигать высоты [11]

$$h_{кап} = H / (1 + \psi_1 H) < h_т, \qquad (4.15)$$

где H – полный напор в начале насадка; ψ_1 – опытный коэффициент (для конических насадков при давлениях до $8 \cdot 10^5$ Па),

$$\psi_1 = 0{,}25 / \left(d_н + d_н^3 \cdot 10^{-3}\right); \qquad (4.16)$$

$d_н$ – выходной диаметр насадка, мм.

Высота $h_{ком}$, которую достигает компактная струя, определяется также через опытный коэффициент ψ в зависимости от высоты $h_{кап}$:

$$h_{ком} = \psi h_{кап}; \qquad (4.17)$$

при этом для $h_{кап}$ = 15,2; 22,9; 30,5; 38,1; 45,7 коэффициент ψ = 0,88; 0,79; 0,73; 0,67; 0,63.

Для наклонной под углом α к горизонту свободной струи длина компактной части определяется связью (4.17), а граница распыленной струи определяется зависимостью

$$L_{max} = \psi_2 h_{кап}, \qquad (4.18)$$

где при α = 0; 30; 60; 90° опытный коэффициент ψ_2 = 1,4; 1,2; 1,07; 1,00.

Как правило, задачей истечения жидкости при *переменном напоре* является определение времени t опорожнения (полного или частичного) резервуаров.

Частными случаями истечения являются:

• опорожнение вертикального резервуара с постоянной площадью $S_р$ его поперечного сечения (по высоте) при отсутствии водопритока ($Q_{доп} = 0$)

$$t = 2S_р(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})/(\mu S\sqrt{2g}), \tag{4.19}$$

где S – площадь выходного отверстия СФУ; μ – коэффициент расхода (табл.4.1); H_1 – начальный уровень жидкости; H_2 – конечный уровень жидкости;

• полное опорожнение резервуара

$$t = 2V/Q_{max}, \tag{4.20}$$

где V – начальный объем жидкости в резервуаре; Q_{max} – расход через СФУ при начальном уровне H_1;

• перетекание жидкости из одного резервуара с поперечным сечением $S_{Р1}$ в другой с $S_{Р2}$ (сообщающиеся сосуды, рис.4.6.),

$$t = \frac{2S_{Р1}S_{Р2}}{S_{Р1} + S_{Р2}} \frac{\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}}{\mu S\sqrt{2g}}, \tag{4.21}$$

где H_1и H_2 – начальная и конечная разность уровней жидкости в резервуарах; μ – коэффициент расхода (табл.4.1);

• опорожнение вертикального резервуара при $S_Р = \text{const}$ при наличии водопритока с расходом $Q_{доп} = \text{const}$ (рис.4.7),

$$\left.\begin{aligned} t &= \frac{2S_р}{\mu S\sqrt{2g}}\left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} + \sqrt{H_0}\ln\frac{\sqrt{H_0} - \sqrt{H_1}}{\sqrt{H_0} - \sqrt{H_2}}\right); \\ H_0 &= \frac{1}{2g}\left(\frac{Q_{доп}}{\mu S}\right)^2. \end{aligned}\right\} \tag{4.22}$$

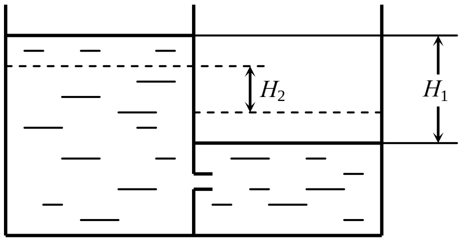


Рис.4.6

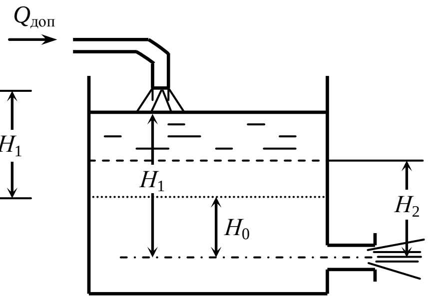


Рис.4.7

Когда $Q_{доп} < Q_{max} = \mu S\sqrt{2gH_1}$, резервуар опорожняется до уровня H_0. Когда $Q_{доп} > Q_{max}$, резервуар наполняется до уровня H_0 – напора при установившемся движении, когда расход СФУ равен водопритоку $Q_{доп}$;

• опорожнение горизонтального цилиндрического резервуара диаметром D (рис.4.8)

$$t = 4L\left[\sqrt{(D-H_2)^3} - \sqrt{(D-H_1)^3}\right]/(3\mu S\sqrt{2g}), \qquad (4.23)$$

где μ – коэффициент расхода СФУ. Как правило, это сложное СФУ, состоящее из нескольких элементов (например, патрубки, вентиль), для которого может быть известен суммарный коэффициент сопро-

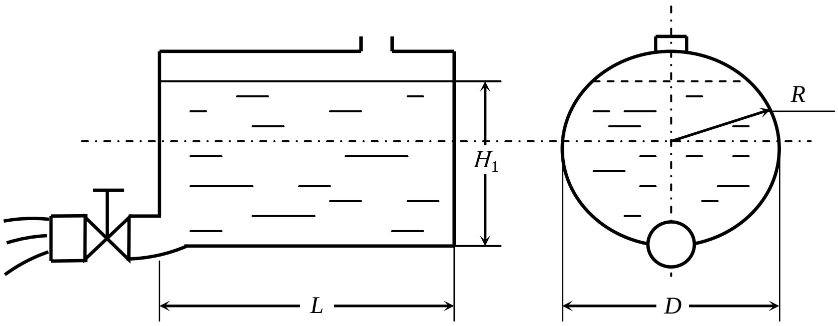


Рис.4.8

тивления $\Sigma\zeta$, и тогда при $\varepsilon = 1$ $\mu = \varphi = 1/\sqrt{1+\Sigma\zeta}$; S – площадь выходного сечения СФУ; H_1 и H_2 – начальный и конечный уровень жидкости в резервуаре.

Гидравлический удар возникает в напорном трубопроводе при неустановившемся движении жидкости, вызванном быстрым изменением скорости потока в результате закрытия или открытия запорных и регулирующих устройств, выключением работающего насоса, закупоркой проходных каналов проточного тракта гидротурбинных двигателей (в приводе горных машин) или насадков гидромониторов, поломками элементов турбодвигателей, вызывающих резкую установку вращающихся частей и т.п. Гидроудар сопровождается резкими колебательными изменениями давления в трубопроводе.

Прямой гидроудар возникает, когда время t закрытия (открытия) запорного (регулирующего) органа удовлетворяет условиям:

$$0 \le t \le T \quad \text{при} \quad T = 2L/C, \tag{4.24}$$

где T – фаза гидроудара; L – длина трубопровода от места регулирования до сечения, в котором поддерживается постоянное давление p_0 (например, до резервуара с напором $H_0 = p_0/\rho g = \text{const}$ или до насоса) (рис.4.9); C – скорость распространения ударной волны.

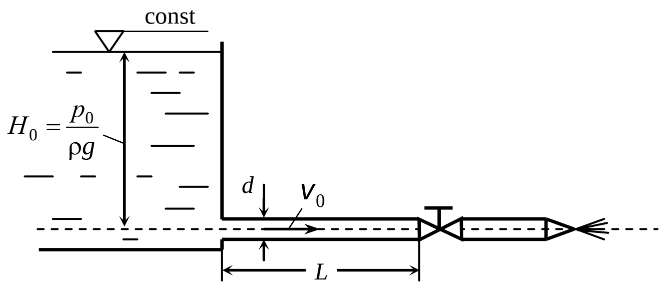


Рис.4.9

По формуле Н.Е.Жуковского приращение давления Δp в результате быстрой остановки потока

$$\Delta p = \rho(v_0 - v_1)C; \quad (4.25)$$

$$C = C_{зв} / \sqrt{1 + \frac{d}{\delta}\frac{E_ж}{E_{тр}}}, \quad (4.26)$$

где v_0 – средняя скорость жидкости в трубопроводе до регулирования; v_1 – средняя скорость жидкости в трубопроводе после регулирования; $C_{зв}$ – скорость распространения звука в покоящейся жидкости в большом объеме,

$$C_{зв} = \sqrt{E_ж / \rho_ж}; \quad (4.27)$$

d – внутренний диаметр трубы; δ – толщина стенки трубы; $E_ж$ – модуль объемной упругости жидкости; $E_{тр}$ – модуль упругости материала трубы; $\rho_ж$ – плотность жидкости.

Полное перекрытие трубопровода ($v_1 = 0$) при прямом гидроударе вызывает повышение давления на величину

$$\Delta p = \rho v_0 C. \quad (4.28)$$

Резкое открытие запирающего органа, приводящее к резкому увеличению скорости потока от $v_0 \geq 0$ до $v_1 > v_0$ при условии (4.24) вызывает понижение давления на величину Δp (по формуле 4.28.).

Непрямой гидроудар имеет место, когда процесс регулирования скорости потока длится дольше продолжительности фазы гидроудара, т.е. при $t > T$. Тогда приращение давления определяется выражением

$$\Delta p = \rho v_0 2L / t_{зак}, \quad (4.29)$$

где $t_{зак}$ – время закрытия запирающего органа.

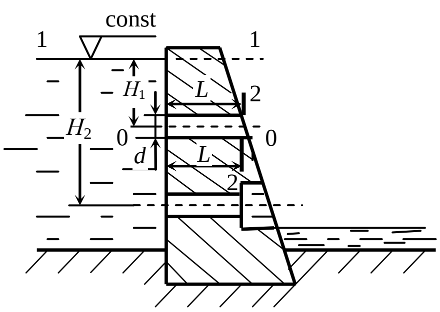
Для последовательно соединенных участков труб

$$t_{зак} = \sum_{i=1}^{n} (2l_i / C_i), \quad (4.30)$$

где n – число участков.

Пример 4.1. В теле железобетонной плотины проектируются два водоспуска диаметром d и длиной L = 6 м. Уровень воды перед верхним водоспуском H_1 = 6,5 м. Истечение в атмосферу.

Определить диаметр d для пропуска через верхний водоспуск расхода Q_1 = 12 м^3/с, а также максимально допустимое заглубление H_2 нижнего водоспуска из условий пропуска максимального расхода Q_2. Определить Q_2.



К примеру 4.1

Решение. До определения диаметра d неясно – водоспуск является «насадком цилиндрическим наружным» или «короткой трубой». Для насадка при l/d = 3-4

$$Q = \mu_н S_н \sqrt{2gH_1}\ , \tag{4.2}$$

где $\mu_н$ – коэффициент расхода.

При $\Sigma\zeta = \zeta_{вх} = 0{,}5$ и $\lambda l/d \to 0$ $\mu_н \approx 0{,}82$ (табл.4.1). Для короткой трубы при $l/d > 4$ формулу (4.31) использовать нельзя, так как $\mu_{тр}$ и $S_{тр}$ зависят от искомого диаметра.

Найдем диаметр, предположив, что водоспуск – насадок,

$$d_н = \sqrt{\frac{4Q}{\pi\mu_н\sqrt{2gH_1}}} = \sqrt{\frac{4\cdot 12}{\pi\cdot 0{,}82\sqrt{2\cdot 9{,}81\cdot 6{,}5}}} = 1{,}285\,\text{м}.$$

При этом $L/d_н = 6/1{,}285 = 4{,}67$, т.е. водоспуск – скорее труба, чем насадок.

Найдем выражение для определения диаметра трубы $d_т$, для чего составим уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2, проведя плоскость сравнения 0-0 через ось трубы:

$$z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{\alpha_1 v_1^{\,2}}{2g}=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}+\left(\lambda\frac{L}{d_т}+\Sigma\zeta\right)\frac{v_т^2}{2g}.$$

где $z_1 = H_1$; $p_1 = p_а$; $v_1 \approx 0$; $z_2 = 0$; $p_2 = p_а$; $v_2 = v_т$; $v_т$ – скорость воды в трубе; $\Sigma\zeta=\zeta_{вх}=0{,}5$; $\alpha_2\approx 1$.

Выразим $v_т$ через расход Q по формуле $v_т=4Q/\pi d_т^2$. Тогда уравнение Бернулли примет вид:

$$H_1=\left(1{,}5+\lambda\frac{L}{d_т}\right)\frac{8Q^2}{g\pi^2 d_т^4}. \qquad (4.32)$$

Примем в первом приближении, что движение воды по трубе соответствует квадратичной области сопротивления, т.е. $\lambda=0{,}11\sqrt[4]{\Delta_э/d_т}$. Для бетонной трубы $\Delta_э$ = 0,5 мм (см. табл.3.1); тогда $\lambda=0{,}01645/\sqrt[4]{d}_т$.

После подстановки в формулу (4.32) H_1 = 6,5 м, $Q=12$ м^3/с, L = 6 м получим выражение

$$0{,}546 d_т^4=1{,}5+0{,}555/\left(d_т\sqrt[4]{d_т}\right). \qquad (4.33)$$

Решаем (4.33) способом последовательных приближений, приняв за первый шаг $d_т = d_н$ = 1,285 м. Находим $d_т$ = 1,361 м (1361 мм) > $d_н$. При этом $L/d_т=4{,}61$, что соответствует понятию «короткая труба»; λ = 0,0152.

Коэффициент расхода

$$\mu_т=1/\sqrt{1+\lambda l/d+\zeta_{вх}}=1/\sqrt{1+0{,}0152\cdot 6/1{,}361+0{,}5}=0{,}80<\mu_н;$$

$$v_т=4Q/\pi d_т^2=4\cdot 12/(\pi\cdot 1{,}361)^2=8{,}25 \text{ м/с}.$$

Таким образом, $\mathrm{Re}=vd/\nu=8{,}25\cdot 1{,}361/(1\cdot 10^{-6})=11{,}23\cdot 10^6$ (квадратичная область сопротивления, формула выбрана верно).

Максимальное заглубление H_2 нижнего водоспуска ограничено требованием получения максимального расхода Q_2. Максимальный расход будет в том случае, если напор H_2 не вызовет отрыва потока в трубе от ее стенок, т.е. не превратит трубу в «отверстие в тонкой стенке» с $\mu_0 < \mu_т$ (см. табл.4.1).

С использованием формулы (4.12) и понятия о давлении насыщенных паров [1] имеем при t = 20 °С, $\varphi_т = \mu_т$ и ε = 0,64 (табл.4.1):

$$H_2 = \frac{p_а - p_{нп}}{\rho g 2\varphi_т^2(1/\varepsilon - 1)} = \frac{98100 - 2340}{10^3 \cdot 9{,}81 \cdot 2 \cdot 0{,}812^2(1/0{,}64 - 1)} \le 13{,}16 \text{ м};$$

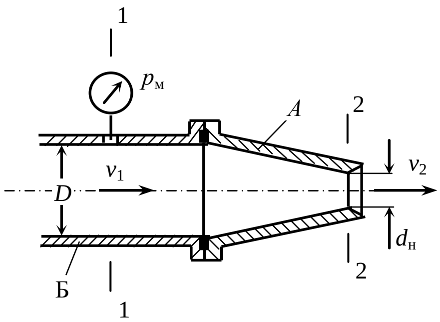
$$Q_2 = \mu_т S_т \sqrt{2gH_2} = 0{,}8 \cdot \pi/4 \cdot 1{,}361^2 \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 13{,}16} = 18{,}97 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Ответ: $d_т$ = 1,361 м; $Q_2 = 18{,}97$ м^3/с.

Пример 4.2. Определить расход воды через конический насадок A гидромонитора с выходным диаметром насадка $d_н$ = 20 мм, если насадок присоединен к стволу $Б$ гидромонитора через плавный переходник, а диаметр ствола D = 100 мм. Манометрическое давление перед насадком $p_м$ = 100 ат.

Решение. Расход при истечении в атмосферу $Q = \mu S\sqrt{2p/\rho}$.

Струя выходит из насадка, потеряв часть энергии в самом насадке (см. табл.4.1, $\zeta_н$ = 0,07). Кроме того, на скорость истечения v_2 влияет скорость подхода воды к насадку v_1. Поэтому составим уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2, проведя плоскость сравнения 0-0 по оси трубы:



К примеру 4.2

$$z_1 + \frac{p_м}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \zeta_н \frac{v_2^2}{2g},$$

где $z_1 = z_2$; предполагая режим движения в стволе $Б$ турбулентным, примем $\alpha_1 \approx 1$; p_2 = 0, так как речь идет об избыточном давлении; в сжатом сечении струи α_2 = 1. После сокращений имеем:

$$\frac{p_м}{\rho g}+\frac{v_1^2}{2g}=\frac{v_2^2}{2g}+\zeta_н\frac{v_2^2}{2g}.$$

Заменим, используя уравнение (3.5), скорость v_1 на v_2:

$$v_1 S_б = v_2 S_н \text{ или } v_1 = v_2\left(S_н / S_б\right) = v_2\left(d_н / D\right)^2.$$

Тогда

$$2p_м / \rho = v_2^2\left(1+\zeta_н-\left(d_н / D\right)^4\right).$$

Откуда

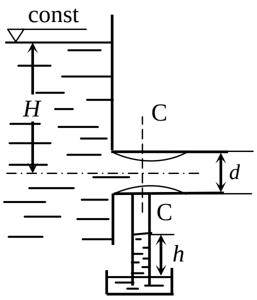
$$v_2 = \sqrt{\frac{2p_м}{\rho\left[1+\zeta_н-\left(\frac{d_н}{D}\right)^4\right]}} = \sqrt{\frac{2\cdot 100\cdot 98100}{10^3\left[1+0{,}07-\left(\frac{20}{100}\right)^4\right]}} = 135{,}51 \text{ м/с}.$$

Искомый расход

$$Q = v_2\varepsilon_н S_н = 135{,}51\cdot 0{,}98\cdot(\pi/4)\cdot 20^2\cdot 10^{-6} =$$
$$= 0{,}0417 \text{ м}^3\text{/с} = 41{,}7 \text{ л/с} = 150{,}1 \text{ м}^3\text{/ч}.$$

Ответ: Q = 150,1 м^3/ч.

ЗАДАЧИ



К задаче 4.1

Задача 4.1. Определить абсолютное давление в сечении С-С, уровень h воды в трубке над свободной поверхностью воды в чашке и расход Q при истечении из внешнего цилиндрического насадка диаметром $d_н$ = 20 мм под постоянным напором H = 2 м.

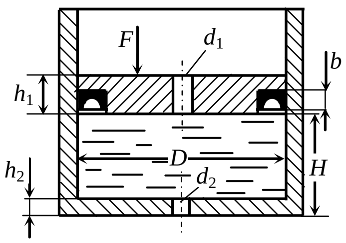
Ответ: $p_{абс}$ = 83258 Па; h = 1,513 м; Q =1,613 л/с.

Задача 4.2. Определить суммарный расход Q масла АМГ-10 [1] из отверстия диаметром d_1 = 5 мм (в поршне) и диаметром

$d_2 = 5$ мм (в днище цилиндра), если поршень массой $m = 100$ кг находится под нагрузкой $F = 1000$ Н.

Силу трения уплотняющей манжеты о стенки цилиндра определить по формуле

$$T = p\pi Dbf,$$



К задаче 4.2

где p – давление под поршнем; f – коэффициент трения резины по стали со смазкой ($f = 0{,}01$); b – ширина уплотняющей поверхности манжеты. Высоту слоя масла над поршнем не учитывать.

Дополнительно задано: высота слоя масла под поршнем $H = 4$ м; диаметр поршня $D = 300$ мм; ширина манжеты $b = 10$ мм; толщина поршня $h_1 = 20$ мм и днища $h_2 = 10$ мм.

Ответ: $Q_1 + Q_2 = 16{,}61$ л/мин.

Задача 4.3. Для условий задачи 4.2 определить соотношение расходов Q_2/Q_1 через соответствующие отверстия в днище цилиндра и в поршне.

Задано: $F = 10^4H$; $m = 50$ кг; $H = 5$ м; $D = 100$ мм; $d_1 = 8$ мм; $d_2 = 4$ мм; $h_1 = 16$ мм; $h_2 = 15$ мм; $b = 10$ мм.

Ответ: $Q_2/Q_1 = 0{,}336$.

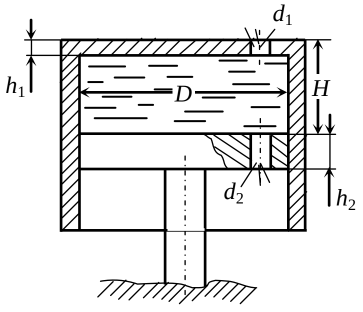
Задача 4.4. Цилиндр массой $m = 100$ кг надет подвижно на поршень диаметром $D = 300$ мм (условно – без протечек между поршнем и цилиндром и без трения).

В днище цилиндра выполнено отверстие диаметром $d_1 = 5$ мм, в поршне – отверстие диаметром $d_2 = 4$ мм. Толщина днища $h_1 = 5$ мм и поршня $h_2 = 20$ мм; $H = 5$ м. Определить соотношение скоростей истечения керосина ($\rho = 806$ кг/м^3) из верхнего (v_1) и нижнего (v_2) отверстий и скорость $v_ц$ опускания цилиндра.

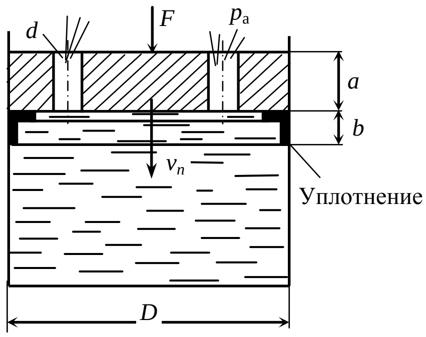
Ответ: $v_1/v_2 = 0{,}603$; $v_ц = 2{,}69$ мм/с.

Задача 4.5. Определить скорость $v_п$ движения поршня вниз под действием нагрузки F = 120 кН. Истечение масла И-25А [1, с.314] из-под поршня в атмосферу происходит через два одинаковых отверстия диаметром d = 10 мм. Поршень диаметром D = 200 мм уплотнен резиновой манжетой шириной b = 10 мм. Коэффициент трения манжеты о стальной корпус принять f = 0,15. Высота поршня a = 35 мм. Массой поршня пренебречь.

Ответ: $v_п$ = 0,374 м/с.



К задаче 4.4



К задаче 4.5

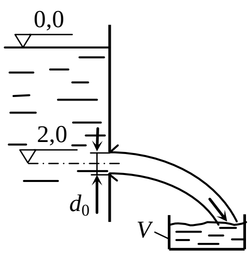
Задача 4.6. Определить диаметр d_0 отверстия в тонкой стенке для заполнения емкости объемом V = 9,36 м^3 за полчаса водой, если центр отверстия расположен ниже уровня воды в накопителе на отметке –2 м.

Ответ: d_0 = 41,3 мм.

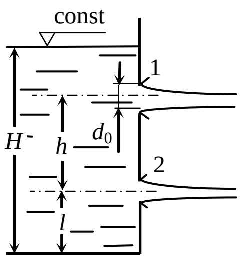
Задача 4.7. Истечение из большого резервуара происходит через два одинаковых отверстия диаметром d = 60 мм, расстояние между центрами которых по вертикали h = 0,5 м.

Определить (с учетом совершенства сжатия струй) глубину H воды в резервуаре, при которой суммарный расход $\Sigma Q = Q_1 + Q_2 = 23 \cdot 10^{-3}$ м^3/с.

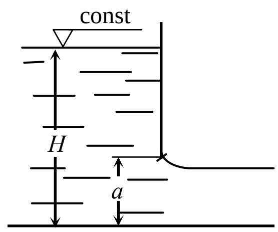
Ответ: H = 2,632 м.



К задаче 4.6



К задаче 4.7



К задаче 4.8

Задача 4.8. Малое квадратное отверстие со стороной a = 36 мм в тонкой вертикальной стенке примыкает одной стороной к дну.

Определить, при какой глубине H воды в резервуаре расход через отверстие будет Q = 4,18 л/с.

Ответ: H = 1,467 м.

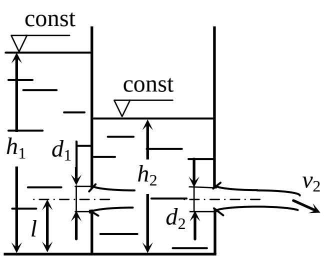
Задача 4.9. В вертикальной тонкой стенке, разделяющий резервуар на две части, выполнено отверстие диаметром d_1 = 50 мм. В боковой стенке правой части резервуара выполнено отверстие диаметром d_2. Оба отверстия расположены соосно и на уровне l = 1 м от дна. Истечение из среднего отверстия – под уровень, из правого – в атмосферу. Уровень воды в левой части h_1 = 2,5 м, в правой – h_2.

Определить уровень h_2 в правой части, диаметр d_2 и скорость истечения v_2 при расходе через среднее отверстие Q = 11,16 м^3/ч.

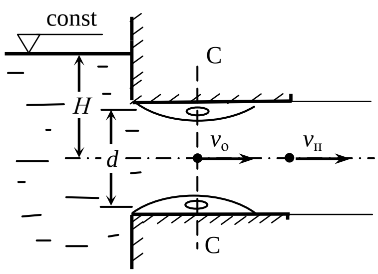
Ответ: h_2 = 2,169 м; d_2 = 36,5 мм; v_2 = 4,646 м/с.

Задача 4.10. Через внешний цилиндрический насадок диаметром d = 38 мм истекает в атмосферу вода с расходом $Q = 5{,}6 \cdot 10^{-3}$ м^3/с. Определить напор H перед насадком, скорость $v_н$ на выходе из насадка и скорость $v_с$ в сжатом сечении, а также абсолютное давление $p_{абс}$ в сечении С-С.

Ответ: H = 1,847 м; $v_н$ = 4,937 м/с; $v_с$ = 7,714 м/с; $p_{абс}$ = 84394 Па.



К задаче 4.9



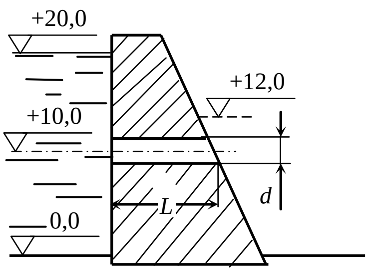
К задаче 4.10

Задача 4.11. В теле железобетонной плотины выполнен водоспуск диаметром d и длиной L = 5 м, предназначенный для пропуска воды с расходом Q = 9 м^3/с при свободном истечении. Водоспуск расположен на отметке ∇ = +10 м. Определить диаметр d. Определить также расход Q_2 при подъеме нижнего уровня воды до отметки ∇ = +12 м.

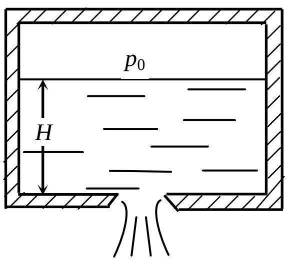
Ответ: d = 1,015 м; Q_2 = 8,069 м^3/с.

Задача 4.12. Из резервуара с избыточным давлением $p_0 = 0$ истекает вода через донное отверстие с острыми кромками при высоте слоя воды H = 3 м. Определить p_0' для увеличения расхода вдвое и p_0'' для уменьшения расхода вдвое через то же отверстие.

Ответ: $p_0' = 0{,}9$ ат; $p_0'' = -0{,}225$ ат.



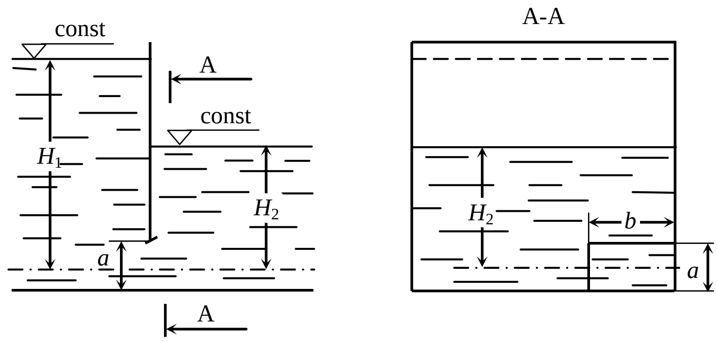
К задаче 4.11



К задаче 4.12

Задача 4.13. Определить расход воды через малое прямоугольное отверстие размерами a = 15 см, b = 20 см в тонкой вертикальной разделительной стенке при глубине погружения центра отверстия под свободной поверхностью с напорной стороны H_1 = 4,4 м, с низконапорной H_2 = 2 м. Отверстие расположено в нижнем углу разделительной стенки.

Ответ: $Q = 133{,}2$ л/с.

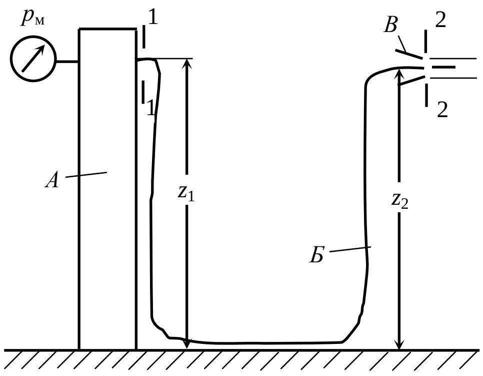


К задаче 4.13

Задача 4.14. Определить расход воды Q из пожарной колонки A при манометрическом давлении в ней $p_м$ = 3 кг/см^2, если отбор воды на пожаротушение осуществляется по горизонтали через гибкий рукав $Б$ длиной $l_р$ = 120 м диаметром $d_р$ = 73 мм и конический сходящийся насадок $В$ с выходным диаметром $d_н$ = 20 мм. Диаметр колонки $D_к$ = 100 мм; изгибами рукава пренебречь; коэффициент Дарси принять λ = 0,025 для квадратичной зоны сопротивления.

Ответ: $Q = 6{,}54$ л/с.

Задача 4.15. Для условий задачи 4.14 определить дальность полета компактной струи $h_{ком}$ при любом угле α наклона насадка к горизонту, а также дальность полета раздробленной струи при α = 0, 30 и 60°. Скорость истечения воды из насадка принять v = 21,3 м/с.



К задачам 4.14, 4.15

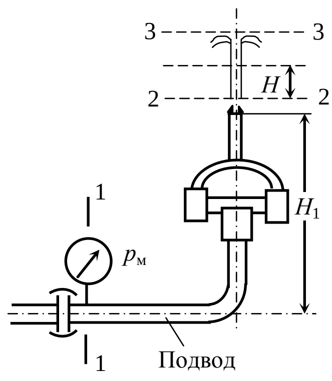
Ответ: при $\alpha = 0°$ $L = 28{,}36$ м; при $\alpha = 30°$ $L = 24{,}31$ м; при $\alpha = 60°$ $L = 21{,}68$ м; $h_{ком} = 16{,}82$ м.

Задача 4.16. Для тушения пожара в условиях крутого падения пласта ствол гидромонитора установлен вертикально вверх; используется низконапорное оборудование. Расход воды $Q = 30$ л/с.

Длина компактной части струи $H = 29$ м; длина трубы от точки установки манометра до входа в насадок $l = 2{,}5$ м; превышение насадка над осью подвода $H_1 = 1{,}2$ м; насадок конический сходящийся с диаметром выходного отверстия $d_н$; условный проход труб гидромонитора $D = 100$ мм; суммарный коэффициент местных сопротивлений $\Sigma\zeta = 30$.

Высотой и сопротивлением насадка пренебречь. Сопротивлением воздуха пренебречь. Трубы стальные, сварные, с незначительной коррозией. Определить диаметр насадка $d_н$ и потребное давление $p_м$.

Ответ: $d_н = 36$ мм; $p_м = 6{,}9$ ат.



К задаче 4.16

Задача 4.17. Гидроцилиндр с двухсторонним штоком заполнен жидкостью без пустот при атмосферном давлении. В поршне выполнено одно сквозное отверстие по типу конического сужающего насадка (см. табл.4.1). К штоку попеременно прикладывают силу F (слева F_1, справа F_2); в результате перетока жидкости из одной полости цилиндра в другую по указанному отверстию в поршне последний перемещается вправо со скоростью v_1, затем влево – со скоростью v_2. Утечек по штоку и поршню нет.

Найти соотношение сил F_2/F_1, обеспечивающее одинаковую скорость движения поршня влево и вправо ($v_2 = v_1 = v_п$), если при движении поршня вправо:

1) отверстие в поршне работает как расширяющийся насадок (см. табл.4.1);

2) отверстие в поршне работает как отверстие в тонкой стенке с острой кромкой.

Ответ: 1) $F_2/F_1 = 3{,}92$; 2) $F_2/F_1 = 2{,}3$.

Задача 4.18. Для условий задачи 4.17 найти соотношение скоростей v_2/v_1 при равенстве попеременно действующих сил $F_1 = F_2 = F$, если при движении поршня вправо:

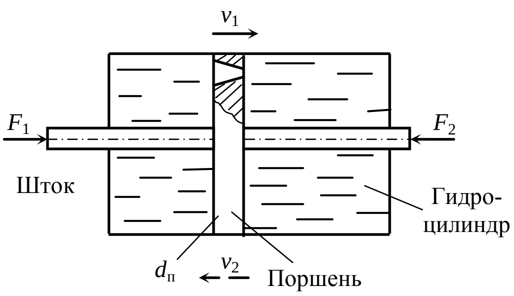
1) отверстие в поршне работает как расширяющийся насадок;

2) отверстие в поршне работает как отверстие в тонкой стенке с острой кромкой.

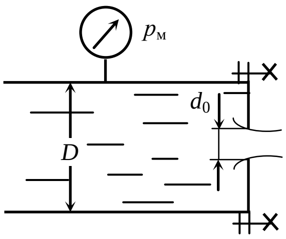
Ответ: 1) $v_2/v_1 = 1{,}98$; 2) $v_2/v_1 = 1{,}52$.

Задача 4.19. Истечение в атмосферу происходит из отверстия с острой кромкой в крышке (заглушке) трубы диаметром D при манометрическом давлении $p_м = 3$ ат с расходом $Q = 30{,}6$ л/с. Определить диаметр трубы D, если диаметр отверстия $d_0 = 50$ мм.

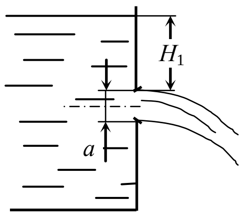
Ответ: $D \approx 100$ мм.



К задачам 4.17, 4.18



К задаче 4.19

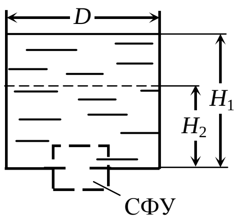


К задаче 4.20

Задача 4.20. В боковой вертикальной стенке резервуара выполнено прямоугольное отверстие шириной $b = 0{,}5$ м и высотой a. Расстояние верхней кромки отверстия до свободной поверхности воды $H_1 = 2$ м. Определить высоту a отверстия из условия пропуска через него воды с расходом $Q = 1$ м^3/с.

Коэффициент расхода μ принять согласно пояснениям к формуле (4.13).

Ответ: $a = 0{,}498$ м.



К задаче 4.21

Задача 4.21. Определить коэффициент расхода струеформирующего устройства (СФУ) и его вид (см. табл.4.1) при истечении воды через это СФУ в дне вертикального цилиндрического открытого бака диаметром $D = 1{,}4$ м, если диаметр СФУ $d = 20$ мм, а уровень воды в баке понизился за $t = 38$ мин от уровня $H_1 = 2{,}6$ м до уровня $H_2 = 1{,}2$ м.

Ответ: $\mu = 0{,}5$.

Задача 4.22. Из полностью заполненной горизонтальной цистерны диаметром $D = 2{,}21$ м и длиной $L = 8{,}2$ м сливают жидкость через сложное СФУ с коэффициентом расхода $\mu = 0{,}62$. Определить время полного опорожнения цистерны при диаметре СФУ $d = 100$ мм.

Ответ: $t = 27{,}8$ мин.

Задача 4.23. Для условий задачи 4.22 найти соотношение времени опорожнения верхней и нижней частей цистерны.

Ответ: $t_1/t_2 = 0{,}547$.

Задача 4.24. Вертикальный цилиндрический резервуар с водой диаметром $D = 4$ м и высотой $H = 60$ м имеет в дне центральное отверстие с острой кромкой. Определить время t полного опорожнения резервуара при диаметре отверстия $d_0 = 0{,}1$ м.

Ответ: $t = 47{,}6$ мин.

Задача 4.25. Вода истекает в атмосферу через боковое отверстие диаметром d = 2,5 см (с острой кромкой) в стенке вертикального цилиндрического резервуара диаметром D = 8 м. Определить время t снижения уровня воды от отметки ∇_1 = +12 м до отметки ∇_2 = + 4,5 м. Нулевая отметка проходит через ось отверстия.

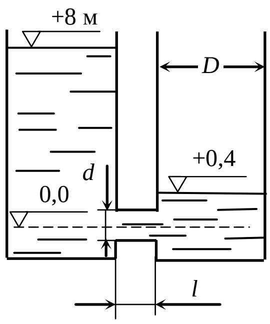
Ответ: t = 27,82 ч.

Задача 4.26. В вертикальном цилиндрическом резервуаре диаметром D = 6 м находится слой воды высотой $H_в$ = 1,1 м и слой нефти ($\rho_н$ = 900 кг/м^3) высотой $H_н$ = 6,2 м. Определить время t слива воды через донный цилиндрический наружный насадок диаметром $d_н$ = 0,1 м.

Ответ: t = 7,35 мин.

Задача 4.27. Из одного резервуара в другой перепускают жидкий нефтепродукт ($\nu = 25{\cdot}10^{-6}$ м^2/с) через короткую трубу с l/d = 5 при диаметре трубы d = 100 мм и шероховатости Δ = 0,1 мм. Диаметры резервуаров одинаковы и равны D = 8 м. Уровни жидкости в начале процесса ∇_1 = +8 м, ∇_2 = +0,4 м. Нулевая плоскость проходит через ось трубы. Приняв коэффициент расхода при истечении через трубу в среднем μ = 0,7, определить время t выравнивания уровней до их разности 0,02 м.

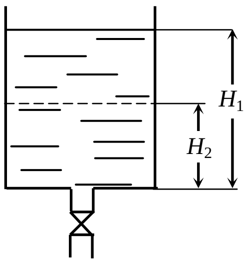
Ответ: t = 1,5 ч.



К задаче 4.27

Задача 4.28. Из цилиндрического вертикального бака с площадью поперечного сечения $S_б$ = 0,95 м^2 вытекает вода через донное СФУ с площадью проходного отверстия S_0 = 3 см^2. Через t = 30 мин после открытия СФУ высота слоя воды в баке оказалось равной H_2 = 25 см. Сколько литров воды вытекло за первые 10 мин? Коэффициент расхода СФУ принять равным μ_0 = 0,62.

Ответ: V = 569 л.



К задаче 4.28

Задача 4.29. Определить время t опорожнения цилиндрического бака площадью $S_б$ = 4 м^2, если начальная отметка уровня воды в нем ∇_1 = +21 м; отметка дна бака ∇_2 = +17,5 м; отметка выхода сливной трубы в атмосферу ∇_3 = +14,5 м. Диаметр трубы d = 0,2 м, ее шероховатость $\Delta_э$ = 0,1 мм; труба имеет прямое колено с α = 90°.

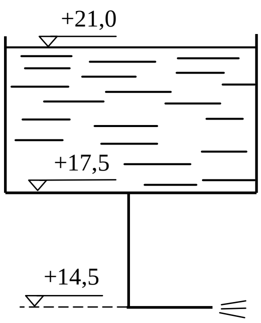
Ответ: t = 3,15 мин.

Задача 4.30. Вода истекает из цилиндрического бака площадью $S_б$ = 1,2 м^2 через малое боковое отверстие в тонкой стенке диаметром d = 30 мм. В резервуар вода поступает с постоянным расходом Q_+ = 2,5·10^{-3} м^3/с. Определить уровень воды H_0 по отношению к оси отверстия 0-0 через t = 20 мин после открытия этого отверстия (запорный орган не показан), если в момент открытия напор перед отверстием составлял H_1 = 1,2 м.

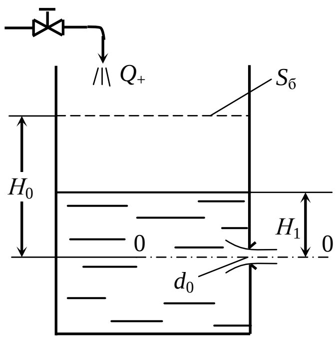
Использовать способ последовательных приближений.

Ответ: H_0 = 1,455 м.

Задача 4.31. Насос подает эмульсию в верхний бак с расходом Q_+ = 6 л/с. Высота бака до сливной трубки H_0 = 1,4 м, диаметр D = 1,6 м. Эмульсия отводится к потребителю через донное составное СФУ с диаметром проходного отверстия d = 25 мм и коэффициентом расхода μ = 0,55. Определить продолжительность t работы насоса для



К задаче 4.29



К задаче 4.30

наполнения бака до отметки сливной трубки, если при его пуске высота слоя эмульсии в баке составила H_1 = 0,1 м при открытом СФУ.

Ответ: t = 8 мин 49 с.

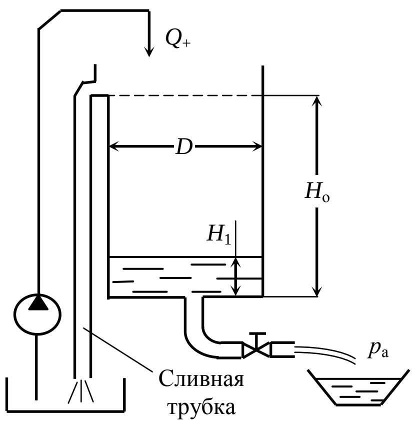
Задача 4.32. Жидкость из цилиндрического вертикального резервуара *А* диаметром D = 1,8 м, наполненного до уровня H = 2,2 м, перетекает в цистерну *Б* через донное СФУ ($d_с$ = 40 мм, $\mu_с$ = 0,82) и заливочную воронку *В*, имеющую суммарный коэффициент сопротивления $\zeta_в$ = 0,7, отнесенный к скорости жидкости $v_в$ в цилиндрической части воронки с $d_в$ = 50 мм, и высоту $h_в$ = 0,5 м. Определить высоту H_1 слоя жидкости в резервуаре *А*, при которой жидкость безусловно сливается в цистерну через воронку, и соответствующий объем V_1.

Пропускная способность СФУ и воронки различна. Если пропускная способность воронки меньше, чем у СФУ, часть жидкости через ловитель *Г* отводится в бачок *Д*, откуда позже насосом возвращается в резервуар *А*.

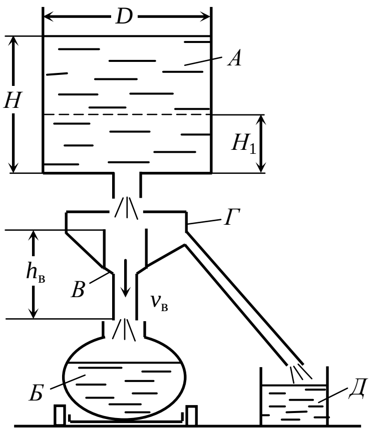
Ответ: H_1 = 1,0675 м; V_1 = 2,715 м^3.

Задача 4.33. Для условий задачи 4.32 определить объем V_2 из слоя $\Delta H = H - H_1$, слившийся в цистерну через воронку *В*, и вместимость V_3 сливного бачка *Д*.

Ответ: V_2 = 2,365 м^3; $V_3 \geq$ 515,5 л.



К задаче 4.31



К задачам 4.32, 4.33

Задача 4.34. Определить давление воды p в статическом режиме ($p = \text{const}$) при допускаемом напряжении материала трубы (сталь) на растяжение $[\sigma]_p = 112{,}8$ МПа и напряжение в материале трубы $\sigma_{уд}$ при мгновенной остановке воды, двигавшейся со скоростью $v_0 = 2$ м/с при температуре $t = 20$ °С, если давление перед задвижкой до ее закрытия составляло $p_0 = 1{,}5$ МПа, а также определить запас прочности трубы $n = [\sigma]_p/\sigma_{уд}$. Диаметр трубы $D = 205$ мм, толщина стенки трубы $\delta = 10{,}5$ мм.

Ответ: $p = 11{,}56$ МПа; $\sigma_{уд} \approx 40$ МПа; $n = 2{,}82$.

Задача 4.35. Стальной пульповод протяженностью $L = 15$ км служит для гидротранспортирования угольной пульпы от шахты (пункт A) до обогатительной фабрики (пункт B). В данный момент пульпопровод заполнен промывочной водой с избыточным давлением $p = 0{,}49$ МПа при температуре $T = 10$ °С и герметично закрыт с обоих концов.

При выполнении ремонтных работ пульпопровод получил пробоину (разгерметизировался). Аппаратура на станциях A и B отметила изменение давления с интервалом 10 с. Установить место разгерметизации рабочей нитки пульповода, если его диаметр $d = 300$ мм, а толщина стенки $\delta = 10$ мм.

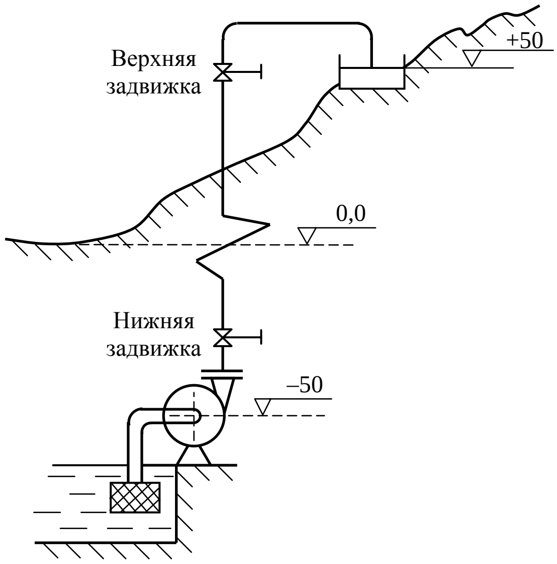
Ответ: место разрыва от станции A на расстоянии 1,38 км.

Задача 4.36. Определить давление воды в стальной трубе после мгновенного закрытия задвижки, если до ее закрытия существовало избыточное давление $p_0 = 5$ кг/см^2, а скорость воды $v_0 = 1$ м/с. Диаметр трубы $d = 0{,}5$ м, толщина стенок $\delta = 5$ мм. Температура воды $T = 20$ °С.

Ответ: $p = 1{,}64$ МПа.

Задача 4.37. По стальному трубопроводу длиной $l = 500$ м и диаметром $d = 150$ мм осуществляют шахтный водоотлив насосом с расходом $Q = 250$ м^3/ч при температуре воды $T = 20$ °С. Насос расположен на отметке $\nabla_1 = -50$ м, зумпф – на отметке $\nabla_2 = +50$ м. Трубопровод оснащен двумя задвижками: после насоса (нижняя) и перед зумпфом (верхняя). Рабочий напор насоса $H_{н,\ раб}$ = 300 м вод.ст. Определить минимально допустимое время $t_{\min}$ закрытия верхней задвижки из расчета максимально возможного повышения давления перед ней в 1,5 раза. Шероховатость труб принять $\Delta_э$ = 0,17 мм. Местные сопротивления учесть по правилу «длинного» трубопровода.

Ответ: $t_{\min}$ = 1,88 с.



К задаче 4.37

Задача 4.38. В трубопроводе диаметром d = 100 мм и длиной l = 1 км в результате закрытия дальней задвижки за $t_з$ = 1,6 с давление воды перед ней повысилось на величину Δp = 0,6 МПа. Определить скорость v_0 движения воды в трубопроводе до закрытия задвижки, если трубы: а) чугунные, δ = 5 мм; б) стальные, δ = 6 мм.

Температура воды T = 10 °С, начальное давление перед задвижкой p_0 = 5 МПа.

Ответ: а) v_0 = 0,480 м/с; б) v_0 = 0,486 м/с.

РАЗДЕЛ 5

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В разделе рассматриваются длинные трубопроводы, последовательное и параллельное соединение простых трубопроводов, трубопроводы с путевой раздачей и распределительные сети (применительно к расчетно-графической работе).

В *длинных* трубопроводах влияние местных потерь энергии Δh или $\Delta p_{м}$ (см. раздел 3) невелико. Эти потери, как правило, учитывают, увеличив потери энергии по длине Δh_l (или Δp_l) на 10 %.

Потери энергии по длине определяются по формуле Дарси:

$$\Delta h_l = \lambda \frac{l}{d}\frac{v^2}{2g} \text{ или } \Delta p_l = \lambda \frac{l}{d}\rho\frac{v^2}{2}, \tag{5.1}$$

где λ – коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси); l – приведенная длина расчетного участка трубы, м; v – средняя скорость потока, м/с; d – диаметр трубы, м; ρ – плотность жидкости, кг/м^3.

Формулу (5.1) можно привести к таким выражениям:

$$\Delta h_l = \frac{Q^2}{K^2} l = il\,; \tag{5.2}$$

$$\Delta h_l = AlQ^2\,; \tag{5.3}$$

$$\Delta h_l = aQ^2\,, \tag{5.4}$$

где Q – объемный расход, м^3/с; A – удельное сопротивление трубопровода, с^2/м^6; K – расходная характеристика, м^3/с; a – полное сопротивление трубопровода, с^2/м^5; i – гидравлический уклон;

$$A = \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5} = \frac{1}{K^2}\,; \tag{5.5}$$

$$K = \sqrt{\frac{g\pi^2 d^5}{8\lambda}} = \frac{1}{\sqrt{A}}\,; \tag{5.6}$$

$$a = \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5} l = \frac{l}{K^2}. \quad (5.7)$$

Для длинных трубопроводов можно пренебречь кинетической составляющей уравнения Бернулли (3.12), так как $v^2/2g << \Delta h_l$. Тогда *разность пьезометрических высот* в рассматриваемых сечениях трубопровода будет примерно равна потерям энергии Δh_l, т.е.

$$\Delta H = \Delta h_l = (z_1 + \frac{p_1}{\rho g}) - (z_2 + \frac{p_2}{\rho g}). \quad (5.8)$$

Параметры A, K и a не зависят от числа Рейнольдса Re, если трубопровод работает в области квадратичного закона сопротивления, но зависят от диаметра трубы d и шероховатости ее стенок $\Delta_э$.

В табл.5.1 даны значения K_4 (четвертая зона) для стальных труб при $\Delta_э$ = 0,02 мм (новые трубы) и $\Delta_э$ = 0,2 мм (трубы после нескольких лет эксплуатации или старые), а также для чугунных труб при $\Delta_э$ = 0,2 мм (новые) и $\Delta_э$ = 1 мм (старые); коэффициент Дарси λ при этом определяется формулой (3.21).

Таблица 5.1

d, мм	Расходная характеристика K_4, л/с			
	Трубы стальные		Трубы чугунные	
	Новые	Старые	Новые	Старые
50	15,2	11,4	11,4	9,3
75	44,4	33,3	33,3	27,2
100	96,1	72,0	72,0	58,9
125	172,4	129,5	129,5	105,9
150	278,9	209,0	209,0	170,9
200	593,0	444,3	444,3	364,0
250	1065	798,8	798,8	652,8
300	1718	1288	1288	1055
350	2572	1933	1933	1581
400	3656	2739	2739	2243
450	5061	3734	3734	3055
500	6571	4921	4921	4027

Часто трубопроводы работают не в квадратичной области сопротивления. Установить область можно, зная число Рейнольдса Re, диаметр d и шероховатость $\Delta_э$ трубы по следующей ориентировочной цепочке соотношений (см. раздел 3):

$$0\ldots^{\mathrm{I}}\ldots 2320\ldots^{\mathrm{II}}\ldots 10\,d/\Delta_э\ldots^{\mathrm{III}}\ldots 500\,d/\Delta_э \quad ^{\mathrm{IV}} \tag{5.9}$$

Область $0 < \mathrm{Re} \leq 2320$ соответствует ламинарному режиму (первая зона). Потери энергии

$$\Delta h_l = 32\frac{lv\nu}{gd^2} = \frac{128\nu}{g\pi d^4}lQ = K_1 lQ, \tag{5.10}$$

где ν – кинематическая вязкость, м^2/с; v – средняя скорость потока, м/с; l – длина рассматриваемого участка трубопровода, м; Q – объемный расход, м^3/с; $K_1 = 128\nu/g\pi d^4$ – постоянная для ламинарного режима, с/м^3.

Область II соответствует зоне гидравлически гладких труб; область III – зоне гидравлически шероховатых труб; область IV – квадратичная.

В общем случае для турбулентного движения рекомендуется формула А.Д.Альтшуля:

$$\lambda = 0{,}11(68/\mathrm{Re} + \Delta_э/d)^{0.25}.$$

Убедившись на основании анализа цепочки (5.9), что рассматриваемый трубопровод работает не в квадратичной зоне, следует ввести на потери энергии (5.2) поправку $\psi > 1$

$$\left.\begin{aligned} \Delta h_l &= \psi\frac{Q^2}{K_4^2}l \\ \psi &= \left(1+\frac{68\nu}{\vartheta\Delta_э}\right)^{0{,}25} = \left(1+\frac{68}{\mathrm{Re}}\frac{d}{\Delta_э}\right)^{0{,}25} = m^{0{,}25} \end{aligned}\right\}, \tag{5.11}$$

где

$$m = 1 + 68\nu/(v\Delta_э) = 1 + 68d/(\mathrm{Re}\,\Delta_э), \tag{5.12}$$

или уменьшить модуль расхода K_4 (табл.5.1) в соответствии с формулой

$$K_3 = K_4 m^{-0,125} \qquad (5.13)$$

Простой трубопровод имеет постоянный диаметр d по всей длине l и не имеет ответвлений.

Для *последовательного* соединения простых трубопроводов полную потерю напора (энергии) определяют по формуле

$$\Delta h_l = Q^2 \sum \left(l_i / K_i^2\right) = Q^2 \sum a_i = Q^2 \sum (A_i l_i). \qquad (5.14)$$

Потери напора на каждом участке определяются формулой (5.2).

При *параллельном* соединении простых трубопроводов потери напора в отдельных ветвях равны, т.е. $\Delta h_{l_1} = \Delta h_{l_2} = \Delta h_{l_3}$ и т.д., а расходы Q_i распределяются по отдельным ветвям согласно зависимости

$$\left.\begin{aligned} \frac{Q_1}{Q_2} &= \frac{K_1}{K_2}\sqrt{\frac{l_2}{l_1}} = \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} = \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_1 l_1}} \\ \frac{Q_1}{Q_3} &= \frac{K_1}{K_3}\sqrt{\frac{l_3}{l_1}}, \qquad \text{и т.д.} \end{aligned}\right\}. \qquad (5.15)$$

Когда жидкость расходуется из трубопровода во многих его точках (путевой расход или непрерывная раздача), потеря напора определяется формулой

$$\Delta h_l = 0,333 Q_0^2 l / K^2, \qquad (5.16)$$

где Q_0 – начальный расход, непрерывно и равномерно расходуемый по длине трубы.

Если часть расхода проходит по трубе транзитом $Q_{тр}$, а часть непрерывно расходуется по длине трубы Q_0, то общая потеря напора

$$\Delta h_l = (Q^2 - QQ_0 + 0,333 Q_0^2) / K^2; \quad Q = Q_{тр} + Q_0. \qquad (5.17)$$

Объяснение структуры и сути *распределительных сетей* производится на примере порядка расчета сети для расчетно-графической работы (РГР).

На рис.5.1 дан пример распределительной сети.

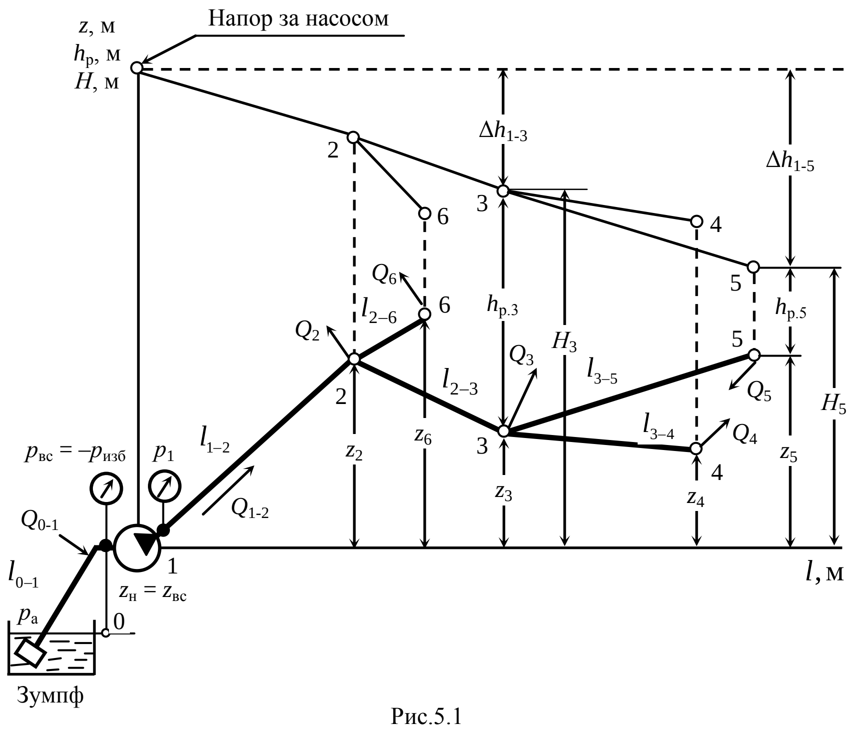


Рис.5.1

В соответствии с заданием (см. задачу 5.14. и табл.5.2) в пределах РГР необходимо:

- построить в масштабе по координатам l (длина) и z (геодезическая отметка) профиль трассы;
- определить диаметры участков трубопровода, рассчитать пьезометрические (H) и рабочие ($h_р$) напоры в заданных точках сети и построить пьезометрическую линию (ПЛ). Ось ординат должна быть общая для z, H и $h_р$;
- определить высоту установки насоса над уровнем воды в зумпфе (высоту всасывания $z_н$) и мощность $N_{дв}$ на валу центробежного насоса (мощность приводного двигателя).

Задано:

• узловые расходы Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6;

• геодезические отметки пунктов потребления z_2, z_3, z_4, z_5, z_6;

• приведенные длины участков, учитывающие находящиеся на них местные сопротивления l_{12}, l_{23}, l_{34}, l_{35}, l_{26};

• рабочий напор $h_{зад}$, ниже которого не может быть фактический, полученный расчетом рабочий напор $h_р$ ($h_{зад}$ задается преподавателем дополнительно);

• коэффициент полезного действия (КПД) насоса $\eta_н$;

• частота вращения рабочего колеса насоса n, об/мин;

• вид труб (табл.5.1). Задается преподавателем дополнительно.

Выбор магистрали. В магистраль должны входить последовательно соединенные участки простых трубопроводов, образующие наиболее нагруженную по расходу и наиболее протяженную линию.

Согласно рис.5.1 в магистраль входят участки 0-1 и 1-2, далее необходимо сравнить между собой направления 2-6, 2-3-4 и 2-3-5.

Пусть в рассматриваемом примере $(\Sigma Q)_{max}$ и $(\Sigma l)_{max}$ относятся к направлению 2-3-5. Тогда магистралью является сеть из участков: 0-1, 1-2, 2-3, 3-5. Участки 2-6 и 3-4, не вошедшие в магистраль, являются ветвями.

Расчет магистрали следует начинать с наиболее удаленного от насоса участка, которым в примере является участок 3-5, и далее рассчитывать участки последовательно против потока (2-3; 1-2; 0-1).

Определить транзитные расходы на участках:

$$Q_{3\text{-}5} = Q_5;\ Q_{3\text{-}4} = Q_4;\ Q_{2\text{-}6} = Q_6;\ Q_{2\text{-}3} = Q_3 + Q_4 + Q_5;$$

$$Q_{0\text{-}1} \approx Q_{1\text{-}2} = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6.$$

Расчет последнего участка магистрали (уч. 3-5). Предварительно определить диаметр d'_{3-5}, используя рекомендацию об ориентировочных скоростях жидкости: при Q = 6-50 л/с $v_{пр}$ = 0,7-1,0 м/с; при Q = 50-120 л/с $v_{пр}$ = 1,0-1,4 м/с;

$$d'_{3-5} = \sqrt{4Q_{3-5}/\pi v_{пр}} = 1{,}13\sqrt{Q_{3-5}/v_{пр}}. \qquad (5.18)$$

Далее по табл.5.1 следует выбрать ближайшее к d'_{3-5} значение d_{3-5} и соответствующий ему модуль расхода K'_{3-5} для заданного вида труб, который до уточнения является приблизительной величиной. Определить фактическую скорость жидкости на данном участке

$$v_{3-5} = 4Q_{3-5} / \pi d^2{}_{3-5}. \qquad (5.19)$$

Определить число Рейнольдса по выражению (3.16) и вязкость (1.12) для воды.

Установить фактическую область сопротивления, используя рекомендации к цепочке (5.9). Если $\mathrm{Re} > 500 d_{3-5} / \Delta_э$, найденный по табл.5.1 модуль расхода K'_{3-5} должен быть принят для дальнейших расчетов. Если $\mathrm{Re} < 500 d_{3-5} / \Delta_э$, следует определить поправку m по формуле (5.12) и откорректировать K'_{3-5} по формуле (5.13). Получим фактический модуль K_{3-5}.

Определить потери напора на участке 3-5 $\Delta h_{3\text{-}5}$ используя выражение (5.2).

Определить полный гидростатический напор в конце участка

$$H_5 = z_5 + h_{зад}; \qquad (5.20)$$

в начале участка

$$H_3 = H_5 + \Delta h_{3\text{-}5}. \qquad (5.21)$$

Определить рабочий напор в начале участка

$$h_{р.3} = H_3 - z_3 \qquad (5.22)$$

и сравнить его с $h_{зад}$. Если $h_{р.3} \geq h_{зад}$, приступить к построению пьезометрической линии (ПЛ) по точкам H_5 и H_3 и далее – к расчету следующего участка магистрали (2-3) по изложенной методике.

При расчете последнего участка магистрали и ветви в пояснительную записку внести все пояснения к расчетным параметрам и формулам. При расчете остальных участков магистрали пояснения можно опустить.

Если $h_{р.3} < h_{зад}$, следует определить величину недостающего напора

$$\delta = h_{\text{зад}} - h_{\text{р.3}} \tag{5.23}$$

и на величину δ поднять напоры в точках 3 и 5, после чего откорректировать ПЛ для участка 3-5. При этом рабочий напор $h_{\text{р.3}}$ будет равен заданному $h_{\text{зад}}$, а напор $h_{\text{р.5}}$ будет больше заданного. Точки H_5 и H_3 соединить на графике прямой линией.

Расчет ветви. Для примера примем ветвь 3-4.

Определить предварительно полный гидростатический напор в конце ветви (точка 4)

$$H_4' = z_4 + h_{\text{зад}}. \tag{5.24}$$

Значение аналогичного напора в начале ветви H_3 было определено при расчете магистрали (5.21).

Диаметр труб на участке 3-4 ($d_{3\text{-}4}$) определяется по величине допустимой потери напора в ветви [$\Delta h_{3\text{-}4}$] следующим образом:

$$[\Delta h_{3-4}] = H_3 - H_4'. \tag{5.25}$$

Определить предварительное значение модуля расхода

$$K_{3-4}' = Q_{3-4}\sqrt{\frac{l_{3-4}}{[\Delta h_{3-4}]}}\,. \tag{5.26}$$

Далее по табл.5.1 следует найти для заданного вида труб ближайшее к K_{3-4}' большее значение модуля. Этому значению K соответствует значение искомого диаметра $d_{3\text{-}4}$.

Определить фактическую скорость жидкости $v_{3\text{-}4}$, используя (5.19); определить критерий Re (3.16), установить фактическую область сопротивления (5.9). Если $\mathrm{Re} > 500 d_{3-5}/\Delta_{\text{э}}$, найденный по табл.5.1 модуль K_{3-4}' принимается для дальнейших расчетов. Если $\mathrm{Re} < 500 d_{3-5}/\Delta_{\text{э}}$, следует определить поправку m (5.12) и откорректировать K_{3-4}' (5.13); получим фактический модуль K_{3-4}.

Определить фактическую потерю напора $\Delta d_{3\text{-}4}$ по (5.2).

Сравнить $\Delta h_{3\text{-}4}$ с [$\Delta h_{3\text{-}4}$]. Если $\Delta h_{3\text{-}4}$ < [$\Delta h_{3\text{-}4}$], приступить к определению гидростатического напора $H_4 = H_4'$ и построению ПЛ для участка 3-4. Если $\Delta h_{3\text{-}4}$ > [$\Delta h_{3\text{-}4}$], следует вернуться к табл.5.1

методики и выбрать следующее большее значение модуля K''_{3-4}. Для K''_{3-4} найти по табл. 5.1 новый $d_{3\text{-}4}$, который будет больше ранее выбранного.

Повторить действия после формулы (5.26); найти новое значение потерь напора $\Delta h_{3\text{-}4}$, которое снова сравнить с $[\Delta h_{3\text{-}4}]$.

Определить фактический напор в точке 4

$$H_4 = H_3 - \Delta h_{3\text{-}4}; \tag{5.27}$$

найти рабочий напор в точке 4 $h_{р.4}$ по (5.22).

Сравнить $h_{р.4}$ с $h_{зад}$. Если $h_{р.4} < h_{зад}$, следует определить δ (5.23) и поднять H_3, H_4 и H_5 на эту величину, при этом скорректировав ПЛ.

Определение приводной мощности насоса. Мощность приводного двигателя (или мощность на валу насоса) определяется по формуле

$$N_{дв} = \frac{\rho g H_н Q_{1-2}}{\eta_н}, \tag{5.28}$$

где $H_н$ – напор, создаваемый насосом; $\eta_н$ – КПД насоса;

$$H_н = H_1 + Z_н + \frac{Q_{0-1}^2}{K_{0-1}^2} l_{0-1} + (\zeta + 1)\frac{v_{0-1}^2}{2g}; \tag{5.29}$$

H_1 – напор на выходе из насоса, определен при расчете участка 1-2 магистрали; ζ – суммарный коэффициент местных сопротивлений во всасывающей линии 0-1, задан в табл. 5.2; 0-1 – индексация параметров всасывающей линии 0-1; $Z_н$ – предельно допустимая высота всасывания насоса по условиям его бескавитационной работы (для РГР – высота установки насоса над уровнем воды в зумпфе),

$$Z_н = \frac{p_а - p_{нп}}{\rho g} - \Delta h_{l_{0-1}} - \Delta h_{м_{0-1}} - [\Delta h]_к; \tag{5.30}$$

$p_а$ – атмосферное давление; $p_{нп}$ – давление насыщенных паров [1]; $\Delta h_{l_{0-1}}$ – потери напора по длине всасывающего трубопровода (5.2); $\Delta h_{м_{0\text{-}1}}$ – местные потери напора (3.22); $v_{0\text{-}1}$ – средняя скорость жидкости во всасывающем трубопроводе; $[\Delta h]_к$ – допустимый кавитационный запас,

$$[\Delta h]_к \approx \Delta h_к^{кр} \cdot 1{,}25; \quad (5.31)$$

$\Delta h_к^{кр}$ – критический кавитационный запас, определяется по формуле С.С.Руднева,

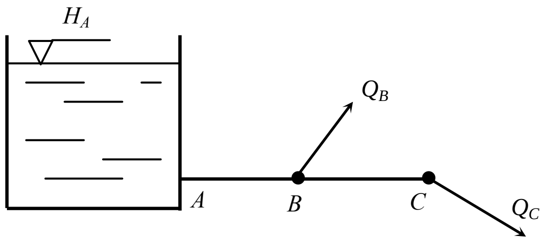
$$\Delta h_к^{кр} = 10(n\sqrt{Q}\,/\,C)^{\frac{4}{3}}; \quad (5.32)$$

C – кавитационный коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей насоса, принять C = 1000.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 5.1. Определить напор в точке B (H_B) и расход в точке C (Q_C) горизонтального трубопровода (трубы стальные, старые), если трубопровод состоит из двух последовательно соединенных участков (AB и BC) с размерами: d_{AB} = 100 мм, d_{BC} = 75 мм, l_{AB} = 470 м, l_{BC} = 365 м.

Известны также пьезометрические напоры H_A = 28 м, H_C = = 19 м и сосредоточенный расход Q_B = 3 л/с.



К примеру 5.1

Решение. Для решения следует составить систему двух уравнений вида (5.2) для участков AB и BC с двумя неизвестными Q_C и H_B.

Потери напора на участке AB

$$\Delta h_{AB} = H_A - H_B = \frac{l_{AB}}{K_{AB}^2}(Q_B + Q_C)^2; \quad (5.33)$$

на участке BC

$$\Delta h_{BC} = H_B - H_C = \frac{l_{BC}}{K_{BC}^2} Q_C{}^2 . \qquad (5.34)$$

Из уравнения (5.34) найдем H_B и подставим в уравнение (5.33); при этом заменим l_i / K_i^2 через a_i по формуле (5.7):

$$Q_C^2 (a_{BC} + a_{AB}) + 2Q_B Q_C a_{AB} + a_{AB} Q_B^2 + H_C - H_A = 0.$$

Отсюда

$$Q_C = -Q_B \frac{a_{AB}}{a_{AB} + a_{BC}} + \sqrt{(Q_B \frac{a_{AB}}{a_{AB} + a_{BC}})^2 - \frac{a_{AB} Q_B^2 + H_C - H_A}{a_{AB} + a_{BC}}} . \qquad (5.35)$$

В задаче не указана область сопротивления, поэтому в первом приближении примем модуль расхода K из табл.5.1 для квадратичной области:

d_{AB} = 100 мм; $K'_{AB} = 72 \cdot 10^{-3}$ м^3/с;

d_{BC} = 75 мм; $K'_{BC} = 33{,}3 \cdot 10^{-3}$ м^3/с.

Вычислим полное сопротивление (5.7)

$$a'_{AB} = \frac{l_{AB}}{(K'_{AB})^2} = \frac{470}{72^2 \cdot 10^{-6}} = 90{,}66 \cdot 10^3 \text{ с}^2/\text{м}^5;$$

$$a'_{BC} = \frac{l_{BC}}{(K'_{BC})^2} = \frac{365}{33{,}3^2 \cdot 10^{-6}} = 329{,}2 \cdot 10^3 \text{ с}^2/\text{м}^5.$$

После подстановки в (5.35) известных составляющих получим

$$Q_C = -0{,}648 \cdot 10^{-3} + 10^{-3} \cdot 4{,}462 = 3{,}81 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с} .$$

Проверим область сопротивления по цепочке (5.9); при этом примем кинематическую вязкость воды $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ м^2/с при t = 20 °С

$$v_{AB}=\frac{4Q_{AB}}{\pi d_{AB}^2}=\frac{4(Q_B+Q_C)}{\pi d_{AB}^2}=\frac{4(3+3{,}81)\cdot 10^{-3}}{\pi 0{,}1^2}=0{,}867 \text{ м/с};$$

$$\mathrm{Re}_{AB}=v_{AB}d_{AB}/\nu=0{,}867\cdot 0.1\cdot 10^6=86700.$$

Для квадратичной зоны $\mathrm{Re}>500 d_{AB}/\Delta_э=500\cdot 100/0{,}2=$ $=250000$; фактически $\mathrm{Re}_{AB}<250000$, следовательно, необходимо ввести на модуль расхода уменьшающую поправку m (5.12) и уточнить K_{AB} по формуле (5.13)

$$m_{AB}=\frac{68}{\mathrm{Re}_{AB}}\frac{d_{AB}}{\Delta_э}+1=\frac{68\cdot 0{,}1}{86700\cdot 0{,}2\cdot 10^{-3}}+1=1{,}392;$$

$$K_{AB}=K'_{AB}m^{-0.125}=72\cdot 10^{-3}\cdot 1{,}392^{-0.125}=69{,}5\cdot 10^{-3} \text{ м}^3\text{/с}.$$

При этом $a_{AB}=\dfrac{l_{AB}}{K_{AB}^2}=\dfrac{470}{69{,}5^2\cdot 10^{-6}}=97{,}3\cdot 10^3$ с^2/м^5.

Аналогичные вычисления выполним для a_{BC}:

$$v_{BC}=\frac{4Q_C}{\pi d_{BC}^2}=\frac{4\cdot 3{,}81\cdot 10^{-3}}{\pi 0{,}075^2}=0{,}823 \text{ м/с}.$$

$$\mathrm{Re}_{BC}=v_{BC}d_{BC}/\nu=0{,}823\cdot 0{,}075\cdot 10^6=61725.$$

$$500\, d_{BC}/\Delta_э=500\cdot 75/0{,}2=187500.$$

Так как $\mathrm{Re}_{BC}<187500$, следует ввести поправку:

$$m_{BC}=\frac{68}{\mathrm{Re}_{BC}}\frac{d_{BC}}{\Delta_э}+1=\frac{68\cdot 75}{61725\cdot 0{,}2}+1=1{,}413.$$

$$K_{BC}=K'_{BC}m^{-0.125}=33{,}3\cdot 10^{-3}\cdot 1{,}413^{-0.125}=31{,}9\cdot 10^{-3} \text{ м}^3\text{/с}.$$

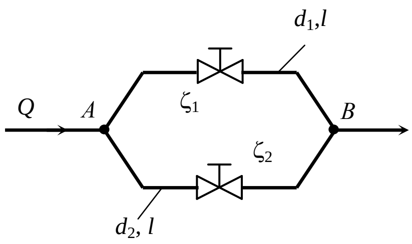
$$a_{BC}=\frac{l_{BC}}{K_{BC}^2}=\frac{365}{31{,}9^2\cdot 10^{-6}}=358{,}9\cdot 10^3 \text{ с}^2\text{/м}^5.$$

Подставив новые данные в формулу (5.35), получим: $Q_C = 3{,}63 \cdot 10^{-3}$ м^3/с. При этом напор в точке B по формуле (5.34):

$$H_B = H_C + a_{BC} Q_C^2 = 19 + 358{,}9 \cdot 10^3 \cdot 3{,}63^2 \cdot 10^{-6} = 23{,}73 \text{ м}.$$

Ответ: Q_C = 3,63 л/с; H_B = 23,73 м.

Пример 5.2. Определить диаметры d_1 и d_2 труб при их параллельном соединении, если длины их одинаковы $l_1 = l_2 = l$ = 1000 м, расходы воды составляют Q_1 = 19,9 л/с, Q_2 = 75,3 м^3/с, а линейные потери напора от A до B Δh = 5,1 м.



К примеру 5.2

Принять: трубу 1 стальную новую с $\Delta_{э.1}$ = 0,02 мм, трубу 2 чугунную старую с $\Delta_{э.2}$ = 1 мм; на трубе 1 установить шиберную задвижку с ζ_1 = 40, на трубе 2 – задвижку с ζ_1 = 15; плотность воды ρ = 1000 кг/м^3, кинематическая вязкость $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ м^2/с при t = 20 °С.

Решение. Определим расходную характеристику K'_i, приближенно считая, что потери энергии соответствуют только потерям по длине, т.е. линейным, а трубопроводы работают в квадратичной области сопротивления.

Из формулы (5.2):

$$K'_1 = Q_1 \sqrt{\frac{l}{\Delta h}} = 19{,}9 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{1000}{5{,}1}} = 279 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3\text{/с};$$

$$K'_2 = Q_2 \sqrt{\frac{l}{\Delta h}} = 75{,}3 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{1000}{5{,}1}} = 1054{,}7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3\text{/с}.$$

По табл.5.1 находим предварительные значения исходных диаметров: d'_1 = 150 мм и d'_2 = 300 мм.

Далее следует установить фактическую область сопротивления (5.9), в которой работают трубы, и при отклонении от квадратичности ввести для K_i' поправку (5.13), а также учесть местные сопротивления, выразив их через эквивалентную длину $l_э$:

$$l_{э.1} = \frac{8}{g\pi^2}(K_1')^2 \frac{\zeta_1}{(d_1')^4} = 0{,}083 \cdot 279^2 \cdot 10^{-6} \frac{40}{0{,}15^4} = 510{,}5\text{ м}; \qquad (5.36)$$

$$l_{э.2} = \frac{8}{g\pi^2}(K_2')^2 \frac{\zeta_2}{(d_2')^4} = 0{,}083 \cdot 1054{,}7^2 \cdot 10^{-6} \frac{15}{0{,}3^4} = 171\text{ м}.$$

Средние скорости потока на участках:

$$v_1' = \frac{4Q_1}{\pi(d_1')^2} = \frac{19{,}9 \cdot 10^{-3}}{0{,}785 \cdot 0{,}15^2} = 1{,}127\text{ м/с};$$

$$v_2' = \frac{4Q_2}{\pi(d_2')^2} = \frac{75{,}3 \cdot 10^{-3}}{0{,}785 \cdot 0{,}3^2} = 1{,}066\text{ м/с}.$$

Числа Рейнольдса:

$$\mathrm{Re}_1 = \frac{v_2' d_1'}{\nu} = 1{,}127 \cdot 0{,}15 \cdot 10^6 = 169050;$$

$$\mathrm{Re}_2 = \frac{v_2' d_2'}{\nu} = 1{,}066 \cdot 0{,}3 \cdot 10^6 = 319800.$$

Область сопротивления:

- для d_1': $500\dfrac{d_1'}{\Delta_{э.1}} = 500\dfrac{150}{0{,}02} = 3750000 > 169050$, следовательно, данная труба работает не в квадратичной области сопротивления, и $K_1 < K_1'$;

• для d_2': $500\dfrac{d_2'}{\Delta_{э.2}} = 500\dfrac{300}{1} = 150000 < 319800$, следовательно, данная труба работает в квадратичной области сопротивления, и $K_2 = K_2'$.

Определим для трубы 1 поправку на неквадратичность (5.12):

$$m_1 = 1 + \frac{68\nu}{v_1'\Delta_{э.1}} = 1 + \frac{68\cdot 10^{-6}}{1{,}127\cdot 0{,}02\cdot 10^{-3}} = 4{,}017; \quad m_2 \approx 1.$$

Фактическая расходная характеристика с учетом области сопротивления и местных сопротивлений:

$$K_1 = K_1'\sqrt{m_1 + \frac{l_{э.1}}{\ell_1}} = 0{,}279\sqrt{4{,}017 + \frac{510{,}5}{1000}} = 0{,}594\,\text{м}^3/\text{с}.$$

По табл.5.1 для K_1 = 593,7 л/с находим d_1 = 200 мм;

$$K_2 = K_2'\sqrt{m_2 + \frac{l_{э.2}}{l_2}} = 1{,}055\sqrt{1 + \frac{171}{1000}} = 1{,}141\,\text{м}^3/\text{с}.$$

По табл.5.1 для K_2 = 1141 л/с нет точного значения d_2, но известно, что d_2' < d_2 < 350 мм. Более точное значение d_2 можно получить по справочникам, содержащим d, $\Delta_э$ и K, или вычислив d_2, исходя из (3.21) и (5.6):

$$\lambda_2 = 0{,}11\sqrt[4]{\frac{\Delta_{э.2}}{d_2}} = \frac{0{,}0196}{\sqrt[4]{d_2}};$$

$$\lambda_2 = \frac{g\pi^2}{8}\frac{d_2^5}{k_2^2} = 9{,}262 d_2^5.$$

Приравнивая эти выражения, находим фактическое значение d_2 = 309 мм.

Ответ: d_1 = 200 мм; d_2 = 309 мм.

ЗАДАЧИ

Задача 5.1. Резервуар объемом $V = 12{,}6$ м^3 требуется наполнить водой за время $t = 30$ мин. Определить расходную характеристику K и диаметр d водопроводной загрязненной трубы, по которой подается вода в резервуар, если ее шероховатость $\Delta_э = 2$ мм, длина $l = 150$ м и располагаемый напор в начале трубы $H = 2{,}6$ м.

Проверка области сопротивления обязательна.

Ответ: $K = 53$ л/с; $d = 100$ мм.

Задача 5.2. Из бака *А* с горизонтом воды на отметке $\nabla_1 = 31$ м в бак *Б* поступает расход $Q = 25{,}8$ л/с по трубопроводу приведенной длины $l = 1520$ м и диаметром $d = 200$ мм. Определить отметку ∇_2 в баке *Б* для двух вариантов:

а) трубы стальные, новые;

б) трубы чугунные, бывшие в употреблении.

Ответ: а) $\nabla_2 = 26{,}7$ м; б) $\nabla_2 = 23{,}4$ м.

Задача 5.3. Для условий задачи 5.2 определить расход Q и область сопротивления для двух вариантов:

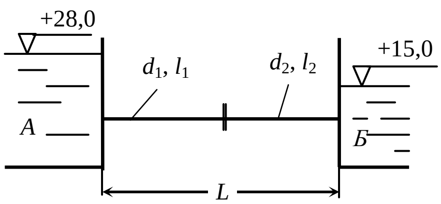
а) отметка $\nabla_2 = 26{,}7$ м, трубы чугунные новые;

б) отметка $\nabla_2 = 23{,}4$ м, трубы стальные новые.

Использовать формулу (5.1) и способ последовательных приближений.

Ответ: а) $Q = 22{,}6$ л/с, переходная область; б) $Q = 35$ л/с, переходная область.

Задача 5.4. Горизонтальный трубопровод общей длиной $L = 760$ м пропускает из резервуара *А* в резервуар *Б* воду с расходом $Q = 18{,}2$ л/с. Трубопровод состоит из двух участков: первый – труба чугунная, бывшая в употреблении; второй – труба стальная, бывшая в употреблении.



К задаче 5.4

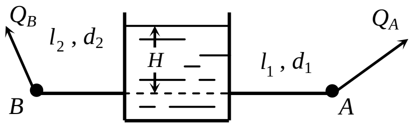
Требуется подобрать диаметры этих труб d_1, d_2 и их длины l_1, l_2, если отметки уровней воды в резервуарах $\nabla_1 = +28$ м, $\nabla_2 = +15$ м.

В данной задаче множество решений. Чтобы сузить область решений, можно, используя данные табл.5.1, определить диапазон диаметров d, предположив, что трубопровод цельный, но представлен в одном случае чугунной трубой, а в другом – стальной.

Ответ: Один из возможных вариантов соответствует $d_1 = 0{,}15$ м, $l_1 = 295{,}5$ м и $d_2 = 0{,}125$ м, $l_2 = 464{,}5$ м.

Задача 5.5. Из резервуара под напором $H = 15{,}4$ м вода поступает по трубам в водозаборные пункты A и B соответственно с расходом $Q_A = 19$ л/с и $Q_B = 38$ л/с. Определить рабочие (пьезометрические) напоры в пунктах A и B ($h_{р.A}$ и $h_{р.B}$), если:

- к пункту A проложена чугунная труба (бывшая в употреблении) диаметром $d_1 = 150$ мм и длиной $l_1 = 432$ м;
- к пункту B проложена новая стальная труба ($d_2 = 200$ мм, $l_2 = 610$ м).



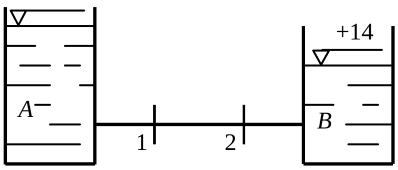
К задачам 5.5, 5.6

Ответ: $h_{р.A} = 10{,}06$ м; $h_{р.B} = 11{,}9$ м.

Задача 5.6. Для условий задачи 5.5 определить пьезометрические напоры в пунктах A и B, если:

- к пункту A проложена новая стальная труба; $d_1 = 150$ мм, $l_1 = 432$ м;
- к пункту B проложена чугунная труба, бывшая в употреблении; $d_2 = 200$ мм, $l_2 = 610$ м.

Ответ: $h_{р.A} = 12{,}73$ м; $h_{р.B} = 8{,}75$ м.



К задаче 5.7

Задача 5.7. Вода с расходом $Q = 18{,}3$ л/с поступает из резервуара A в резервуар B по трубопроводу, составленному из трех последовательно соединенных участков стальных труб, бывших в употреблении, со следующими размерами:

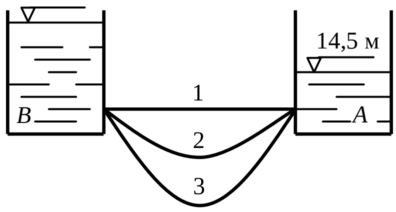
	Участок A – 1	Участок 1 – 2	Участок 2 – B
Диаметр d, мм	200	150	125
Длина l, м	570	460	300

Определить отметку горизонта воды в резервуаре A (H_A) и пьезометрические напоры в узлах 1 и 2.

Местными сопротивлениями пренебречь. Проверка области сопротивления обязательна.

Ответ: H_A = 25,18 м; H_1 = 24,09 м; H_2 = 20,30 м.

Задача 5.8. В резервуар A из резервуара B поступает расход Q = 160 л/с по трем стальным трубопроводам (бывшим в употреблении) размерами: d_1 = 0,2 м, l_1 = 815 м; d_2 = 0,15 м, l_2 = 510 м; d_3 = 0,1 м, l_3 = 436 м.



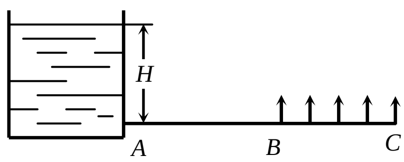
К задаче 5.8

Определить начальную отметку уровня воды в резервуаре B (H_B) и расходы Q_1, Q_2, Q_3.

После определения расходов проверить область гидравлического сопротивления для труб 1, 2 и 3.

Ответ: H_B = 46,5 м; Q_1 = 88 л/с; Q_2 = 52,4 л/с; Q_3 = 19,5 л/с.

Задача 5.9. Вода поступает из резервуара к потребителям на участке BC с непрерывной раздачей.



К задаче 5.9

Определить потери напора $\Delta h_{AC} = H$ при расходе воды Q = 12 л/с, диаметре трубопровода d = 0,125 м и длинах участков:

l_{AB} = 510 м, l_{BC} = 340 м, трубы представлены в двух вариантах:

а) трубы чугунные, бывшие в употреблении;

б) трубы стальные, бывшие в употреблении.

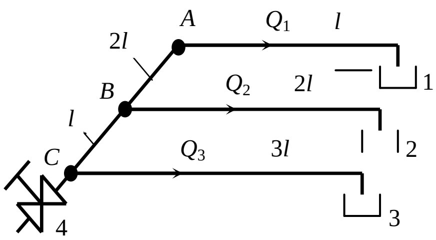
Ответ: $H_а$ = 8 м; $H_б$ = 5,8 м.

Задача 5.10. По системе горизонтальных трубопроводов одинакового сечения при открытии задвижки 4 подают жидкость в резервуары 1, 2 и 3 одинаковой вместимостью *V*. После достижения в одном из резервуаров объема *V* задвижку 4 закрывают.

Определить объем жидкости в каждом из двух других резервуаров, если режим движения жидкости во всех трубопроводах ламинарный.

Потери энергии в местных сопротивлениях и объем жидкости в трубах не учитывать.

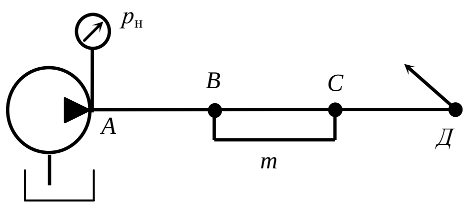
Ответ: $V_3 = V$; $V_2 = \frac{9}{11}V$; $V_1 = \frac{6}{11}V$.



К задачам 5.10 и 5.11

Задача 5.11. Для условий задачи 5.10 определить, в каких трубопроводах необходимо установить дополнительные местные сопротивления и какой эквивалентной длины $l_э$, чтобы резервуары заполнились одновременно.

Ответ: 1) дополнительные местные сопротивления следует установить в трубопроводах *C* – 3 и *B* – 2. 2) $l_{э.C–3} = 2l$; $l_{э.B–2} = l$.



К задачам 5.12 и 5.13

Задача 5.12. Трубопровод чугунный, бывший в употреблении, имеет параллельное ответвление на участке *BC*.

Таблица 5.2

Номер варианта	Участковые расходы, л/с					Длины участков, м						Геодезические отметки, м					Коэффициент местных сопротивлений $\zeta_{0\text{-}1}$	Частота вращения насоса n, об/мин	КПД насоса, $\eta_н$
	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	$l_{0\text{-}1}$	$l_{1\text{-}2}$	$l_{2\text{-}3}$	$l_{3\text{-}4}$	$l_{4\text{-}5}$	$l_{2\text{-}6}$	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6			
1	15	23	17	25	20	30	3100	2200	1000	3500	4100	35	37	33	50	45	15	900	0,7
2	19	14	20	16	25	35	3000	2300	1100	3400	4200	47	35	50	33	60	17	900	0,69
3	20	19	15	27	21	40	2900	2400	1200	3300	4300	40	37	45	30	55	19	900	0,68
4	16	20	19	25	18	45	2800	2100	1300	3200	4400	44	40	56	33	65	18	900	0,66
5	13	16	21	27	19	50	2700	2200	1400	3100	4500	39	47	57	50	70	16	900	0,65
6	21	13	23	25	21	55	2600	2000	1500	3500	4600	43	39	59	45	68	20	1000	0,66
7	27	21	13	19	24	50	2500	2800	1600	3400	4700	42	35	62	56	66	21	1000	0,67
8	12	27	21	13	25	45	2400	2900	1700	3300	4800	37	40	65	57	67	22	1000	0,68
9	18	12	27	21	23	40	2300	3000	1800	3200	4900	39	33	66	59	41	19	1000	0,69
10	16	18	12	27	23	35	2200	3100	1900	3500	5000	40	35	67	62	55	17	1000	0,70
11	25	16	18	23	27	30	2100	3200	2600	3400	4900	43	41	68	65	33	15	1100	0,65
12	23	25	16	18	22	55	2000	3300	2500	1700	4800	45	50	70	66	35	16	1100	0,66
13	19	23	25	16	27	50	2100	3200	2600	1600	4700	40	47	68	61	39	19	1100	0,67
14	17	19	29	21	13	45	2200	3100	2700	1500	4600	37	55	67	60	44	20	1100	0,68
15	21	17	19	29	23	40	2300	3000	2800	1400	4500	35	50	65	39	46	21	1100	0,69
16	15	21	18	25	19	35	2400	2900	3500	1300	4400	33	54	63	42	39	22	1200	0,7

Окончание табл. 5.2

Номер варианта	Участковые расходы, л/с					Длины участков, м						Геодезические отметки, м					Коэффициент местных сопротивлений $\zeta_{0\text{-}1}$	Частота вращения насоса n, об/мин	КПД насоса, $\eta_н$
	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	$l_{0\text{-}1}$	$l_{1\text{-}2}$	$l_{2\text{-}3}$	$l_{3\text{-}4}$	$l_{4\text{-}5}$	$l_{2\text{-}6}$	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6			
17	27	15	19	21	12	30	2500	2800	3400	1200	4300	30	55	61	44	70	21	1200	0,71
18	25	27	15	19	21	35	2600	2700	3300	1100	4200	35	47	60	55	70	20	1200	0,72
19	18	25	23	15	29	40	2700	2600	3200	1700	4100	39	46	63	51	68	19	1200	0,73
20	17	18	25	23	15	45	2800	2500	3100	1800	4000	42	49	61	57	66	18	1200	0,74
21	23	17	18	25	13	50	2900	2400	3000	1900	5000	31	53	68	45	39	17	900	0,75
22	19	23	17	21	29	55	3000	2300	1700	2000	4900	36	48	65	53	42	16	900	0,74
23	16	19	23	27	20	45	3100	2200	1600	2700	4800	42	54	64	39	69	15	900	0,73
24	15	16	25	23	19	40	3200	2100	1500	3500	4700	44	57	67	37	51	20	900	0,72
25	12	15	21	27	18	35	3300	2000	1400	3600	4600	38	55	69	49	33	22	900	0,71

Определить давление $p_н$, развиваемое насосом для прокачки по трубопроводу воды с расходом $Q = 80 \cdot 10^{-3}$ м^3/с, если в конце трубопровода (точка *Д*) свободный напор должен составлять $H_Д = 20$ м.

Размеры труб на участках:

Участок *AB*	Участок *BmC*	Участок *BC*	Участок *СД*
$l_1 = 250$ м	$l_2 = 200$ м	$l_3 = 150$ м	$l_4 = 300$ м
$d_1 = 300$ мм	$d_2 = 250$ мм	$d_3 = 200$ мм	$d_4 = 250$ мм

Проверка области сопротивления обязательна.

Ответ: $p_н = 0{,}27$ МПа.

Задача 5.13. Решить задачу 5.12 для новых чугунных труб, если суммарный расход составляет $Q = 160$ л/с. Определение области сопротивления обязательно.

Ответ: $p_н = 0{,}38$ МПа.

Задача 5.14. Для одного из указанных в табл.5.2 варианта условий построить профиль трассы трубопроводов распределительной сети и пьезометрическую линию, а также определить высоту установки насоса $Z_н$ и приводную мощность насоса $N_{пр}$.

РАЗДЕЛ 6

ФИЛЬТРАЦИЯ

Фильтрация – движение жидкостей в пористых средах.

Опытный закон ламинарной фильтрации (Дарси)

$$Q = kSi = kS\Delta h_l / L\,, \qquad (6.1)$$

где Q – фильтрационный расход, м^3/с; S – полная площадь поперечного сечения потока, нормального к направлению движения жидкости, включающая поры и твердые частицы фильтрующего материала, м^2; i – гидравлический уклон; Δh_l – линейные потери напора, м; L – длина участка, на котором отмечаются потери Δh_l, м; k – коэффициент фильтрации, м/с, в справочниках [5, 6, 11] обычно дается в см/с (табл.6.1), зависит от материала пористой среды и вида фильтруемой жидкости.

Таблица 6.1

Фильтрующий материал	k, см/с
Гравий с размером зерен d_e = 4-7 мм	3,0-3,5
Мелкий гравий	3,0
Крупный чистый песок с $d_e \approx$ 2 мм	0,01-0,06
Мелкий чистый песок с d_e = 0,33-0,25 мм	0,001-0,006
Супесь	0,0003
Песчано-глинистый грунт	0,006-0,0001
Суглинок	$1\cdot10^{-4}$-$6\cdot10^{-5}$
Глины	$(1\text{-}6)\cdot10^{-6}$
Глина плотная	10^{-7}-10^{-10}
Войлок	0,003-0,004

Коэффициент фильтрации для некоторых условий можно также определить расчетным путем. Так, например, для песчаных грунтов с известным размером зерен d_e (эффективный диаметр частиц песка) применяют формулу Хазена

$$k = c_m d_e^2 g / \nu, \qquad (6.2)$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости; c_m – коэффициент, зависящий от пористости m материала среды [5]:

Грунт	c_m
Очень плотные пески	$8{,}5\cdot10^{-4}$
Пески средней пористости	$16\cdot10^{-4}$

Скорость фильтрации через материал с поверхностью S

$$v = ki = Q / S \qquad (6.3)$$

отличается от *истинной скорости* фильтрации

$$u = v / m, \qquad (6.4)$$

учитывающей пористость материала m (m = 0,3-0,5). При расчетах используют скорость v.

Для *безнапорной* фильтрации при равномерном движении жидкости расход Q и скорость v определяют по формулам (6.1) и (6.3) при уклоне i водоупорного подстилающего слоя (ВПС).

Удельный расход – расход на единицу ширины потока l

$$q = Q / l\,. \qquad (6.5)$$

Для *неравномерного* (плавноизменяющегося) движения жидкости при i = 0 приток жидкости к траншее (рис.6.1) с одной ее стороны определяется *дебитом* по формуле

$$Q = \frac{kl}{2L - b}\left(H^2 - h^2\right), \qquad (6.6)$$

где l – длина траншеи (или ширина потока); b – ширина траншеи; L – ширина зоны влияния траншеи; H – мощность водоносного слоя или статический напор, измеренный от уровня ВПС; h – глубина жидкости в траншее в период ее откачки или ордината кривой депрессии у стенки траншеи (динамический напор).

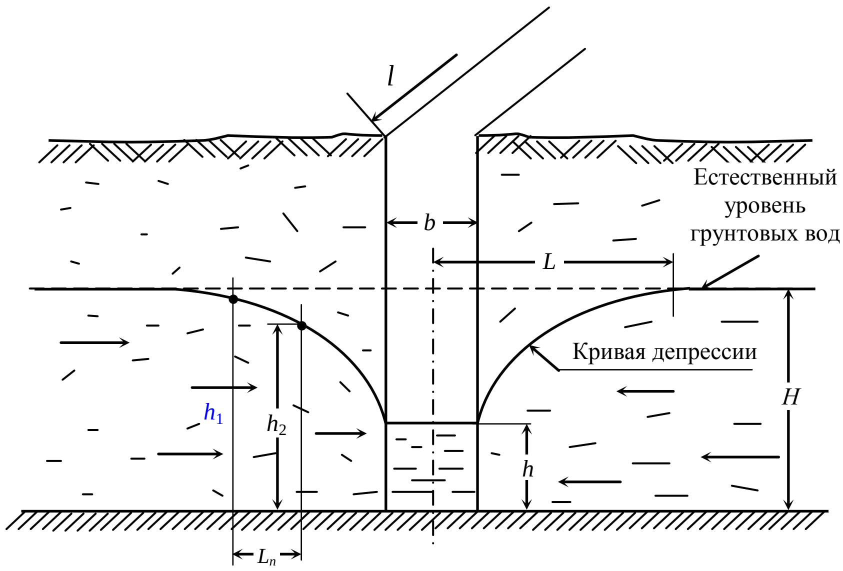


Рис.6.1

Если известны координаты h_1 и h_2 *кривой депрессии*, которая представляет собой свободную поверхность грунтовых вод (пьезометрическую линию) для широкого потока фильтрационной жидкости, то можно использовать формулу (6.7), например, для определения удельного расхода:

$$q = k\left(h_1^2 - h_2^2\right)/\,2L_n\,; \qquad (6.7)$$

где L_n – расстояние между сечениями с координатами h_1 и h_2.

Движение жидкости к *совершенной скважине* (скважина совершенна, если она проведена до ВПС и ее проницаемая поверхность $S = 2\pi rh$) радиусом r при безнапорной фильтрации характеризуется зависимостью для дебита:

$$Q = \pi k(H^2 - h^2)/\ln(R/r) = 1{,}36k(H^2 - h^2)/\lg(R/r), \qquad (6.8)$$

где h – глубина жидкости в колодце при ее откачке или ордината кривой депрессии у стенки колодца; R – радиус влияния колодца (рис.6.2).

При предварительных расчетах величину R можно определить по эмпирической зависимости Зихардта:

$$R \approx 3000(H-h)\sqrt{k}\,, \qquad (6.9)$$

где H, h – в метрах; k – в литрах в секунду.

Дебит *артезианского* колодца (колодец считается артезианским, если водоносный слой мощностью M сжат горными породами и имеет избыточное давление p по всей толще этого слоя) можно определить по формуле

$$Q = 2\pi Mk(H-h)/\ln(R/r) = 2{,}73Mk(H-h)/\lg(R/r), \qquad (6.10)$$

где M – мощность водоносного пласта (рис 6.3).

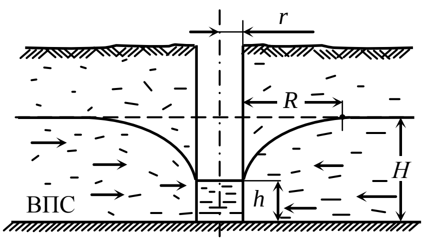


Рис.6.2

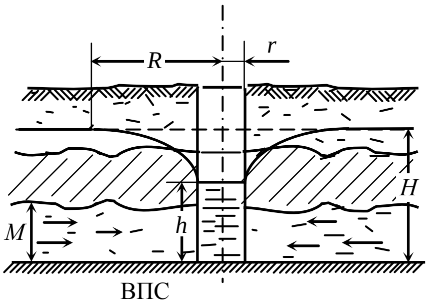


Рис.6.3

Дебит совершенного колодца, расположенного вблизи водоема, определяется зависимостью (6.8) при $R = 2l$, где l – расстояние от оси колодца до берега водоема.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Из канала (рис.6.4) вода фильтруется в нижерасположенный водоем по ВПС с удельным фильтрационным расходом q = 0,04 (м^3/с)/м. ВПС имеет прямой уклон i = 0,02. Грунт соответствует коэффициенту фильтрации k = 0,01 см/с.

Построить кривую депрессии от канала до водоема, если глубина потока у канала h_1 = 2,2 м, а у водоема h_2 = 4 м.

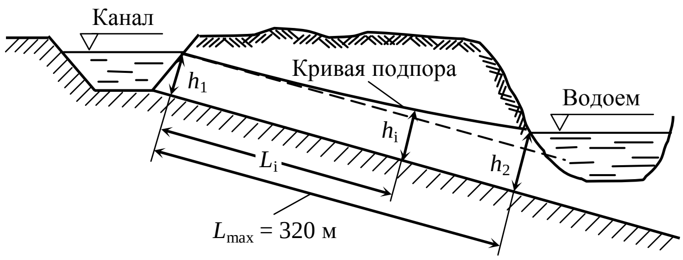


Рис. 6.4

Решение. Определить глубину слоя воды h_0 при равномерном движении.

Согласно (6.1)

$$Q = kiS = kih_o l, \text{ откуда } h_o = Q(lki).$$

Но в соответствии с (6.5) $Q/l = q,$ следовательно

$$h_0 = \frac{q}{ki} = \frac{0{,}04}{0{,}01 \cdot 0{,}02} = 2{,}0 \text{ м.}$$

Для нахождения координат h_i и L_i кривой депрессии (в настоящем случае это кривая подпора) используем уравнение [6]

$$L = \frac{h_o}{i}\left(\eta_2 - \eta_1 + \ln\frac{\eta_2 - 1}{\eta_1 - 1}\right), \tag{6.11}$$

где $\eta_1 = h_1/h_o = 2{,}2/2 = 1{,}1;$ $\eta_2 = h_2/h_o = 4/2 = 2.$

Тогда расстояние от канала до водоема будет

$$L_{max} = \frac{2}{0{,}02}\left(2 - 1{,}1 + \ln\frac{2-1}{1{,}1-1}\right) = 100(0{,}9 + \ln 10) = 320 \text{ м.}$$

Назначим некоторое промежуточное значение h_i в диапазоне $h_1 < h_i < h_2$, например, $h_i = 3$ м и найдем по (6.11) для него L_i при $\eta_1 = h_1/h_o = 1{,}1$ и $\eta_2 = h_i/h_o = 3/2 = 1{,}5,$ т.е.

$$L_i = 100\left(1{,}5 - 1{,}1 + \ln\frac{1{,}5-1}{1{,}1-1}\right) = 100(0{,}4 + \ln 5) = 201\text{м}.$$

Задавая различные значения h_i, будем иметь соответствующую координату L_i. Наличие пар $h_i - L_i$ позволяет построить искомую кривую.

ЗАДАЧИ

Задача 6.1. Определить скорость движения грунтовых вод v в песчано-глинистом грунте при уклоне водоупорного подстилающего слоя i = 0,03 и фактическое число Рейнольдса $\mathrm{Re}_ф$, если эффективный диаметр частиц пористой среды d_e = 1 мм, коэффициент пористости m = 0,42, а температура воды t = 8 °C.

Определить $\mathrm{Re}_ф$ по формуле из [5]

$$\mathrm{Re}_ф = \frac{v d_е}{\nu}\frac{1}{0{,}75m + 0{,}23}. \tag{6.12}$$

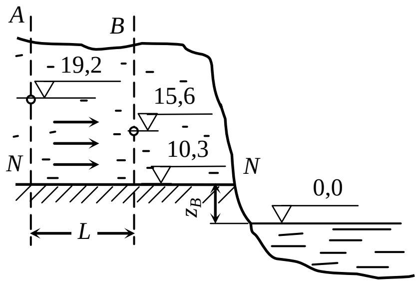
Ответ: $v = (1{,}8\text{-}0{,}03)\cdot 10^{-3}$ мм/с; $\mathrm{Re}_ф = (2{,}4\text{-}0{,}04)\cdot 10^{-3}$.

Задача 6.2. Основание *N*-*N* водоносного пласта в створах *A* и *B*, расстояние между которыми L = 1000 м, расположено на отметках $z_A = z_B$ = 10,3 м.

Уровни грунтовых вод в створах *A* и *B* находятся на отметках, соответственно 19,2 и 15,6 м.

Определить удельный расход воды q в песчаном крупнозернистом грунте (расход на ширине L = 1 м).

Ответ: q = 27,6 л/ч.



К задаче 6.2

Задача 6.3. Определить скорость движения грунтовых вод v в песчаном грунте при уклоне водоупорного подстилающего

щего слоя $i = 0{,}01$ и фактическое число Рейнольдса $Re_ф$ для диаметра частиц пористой среды $d_e = 0{,}33$ мм (плотный песок), если температура воды $t = 12°$ С.

Ответ: $v = 7{,}4 \cdot 10^{-3}$ мм/с; $Re_ф = 3{,}63 \cdot 10^{-3}$.

Задача 6.4. Фильтруемая жидкость (вода или масло АМГ-10) из хранилища поступает пользователю через цилиндрический вертикальный фильтр диаметром $D = 1{,}5$ м и высотой $h = 1$ м. Цилиндр заполнен пористым материалом со средним диаметром зерна $d_e = 1$ мм, что соответствует песку средней пористости. Слой жидкости в хранилище $H = 2$ м.

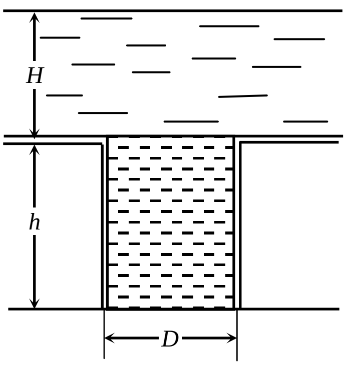
Определить пропускную способность фильтра (расход) для воды при температуре $t = 20$ °С ($Q_в$) и для масла при температуре $t = 50$ °С ($Q_м$).

Ответ: $Q_в = 82$ л/с; $Q_м = 8{,}3$ л/с.

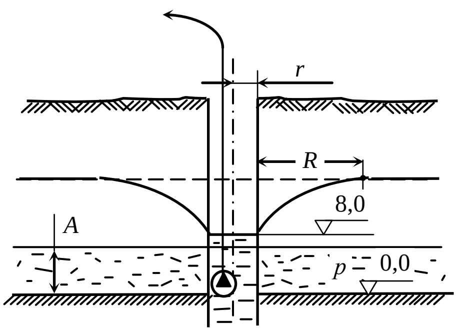
Задача 6.5. Артезианский колодец радиусом $r = 0{,}3$ м проведен через водоносный пласт галечно-песчаного грунта толщиной $A = 5$ м, в котором грунтовые воды находятся под избыточным давлением $p = 1{,}6 \cdot 10^5$ Па.

Определить дебит колодца Q, если радиус его влияния R составляет 80 м, а динамический уровень h воды в колодце находится на отметке 8,0 м.

Ответ: $Q = 64$ л/с при $k = 0{,}86 \cdot 10^{-3}$ м/с.



К задаче 6.4



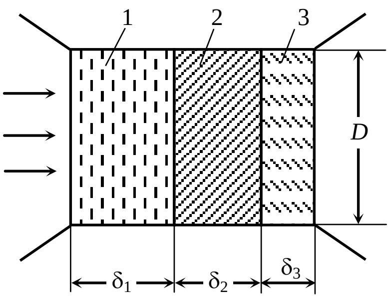
К задаче 6.5

Задача 6.6. Водоносный пласт толщиной $A = 20$ м, образованный крупнозернистым песком, пройден скважиной радиусом $R = 0{,}1$ м на всю толщину пласта.

Определить приток воды к скважине, если динамический уровень воды в ней $h = 15$ м.

Ответ: $Q = 34$ л/с.

Задача 6.7. Для очистки воздуха от вредных примесей его пропускают через трехслойный фильтр $D = 0{,}1$ м. Фильтрационные слои имеют следующие характеристики: толщина $\delta_1 = 0{,}4$ м; $\delta_2 = 0{,}15$ м; $\delta_3 = 0{,}1$ м; коэффициент фильтрации $k_1 = 2\cdot10^{-2}$ м/с, $k_2 = 3\cdot10^{-3}$ м/с, $k_3 = 5\cdot10^{-4}$ м/с.



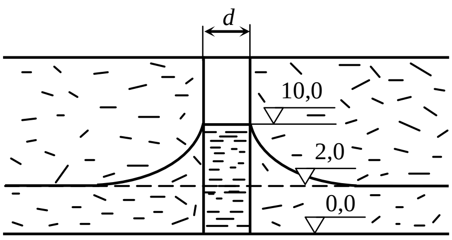
К задаче 6.7

Определить пропускную способность фильтра, если суммарный перепад давлений на трех слоях $\Delta p = 2500$ Па. Температура воздуха 20 °С.

Используя положения раздела 5 о последовательном соединении транспортирующих гидросистем, определить сначала перепад давления в каждом слое.

Ответ: $Q = 22{,}2$ м^3/ч.

Задача 6.8. Скважину диаметром $d = 0{,}4$ м, проведенную до непроницаемых пород ($\nabla 0{,}0$) в плотном песчаном грунте с диаметром частиц $d_e = 0{,}1$ мм, заполняют водой при температуре $t = 20$°С до отметки $\nabla 10{,}0$ м. Определить поглощающую способность скважины, если уровень воды в пласте грунта находится на отметке $\nabla 2{,}0$ м.



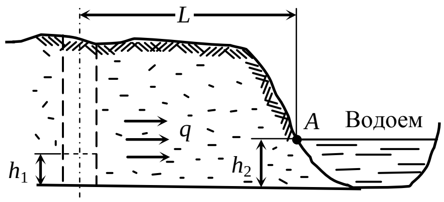
К задаче 6.8

Для определения Q использовать формулу (6.8). При этом радиус R определить по Зихардту, а коэффициент k – по Хазену.

Ответ: $Q = 4 \cdot 10^{-3}$ м^3/с.

Задача 6.9. Установить вид водоносного грунта, если известно, что при равномерном движении грунтового потока уклон подстилающего водонепроницаемого слоя составляет $i = 0{,}04$, глубина потока $h_0 = 2{,}8$ м, а фильтрационный расход на 1 м ширины потока $q = 0{,}018$ (л/с)/м.

Ответ: грунт – крупный песок.



К задаче 6.10

Задача 6.10. Вода в водоносном слое грунта движется в сторону водоема с удельным фильтрационным расходом $q = 0{,}05$ (см^3/с)/см по подстилающему водонепроницаемому слою, имеющему прямой уклон $i = 0{,}05$.

Определить расстояние L от точки A уреза воды в водоеме с $h_2 = 6{,}5$ м до оси проектируемой скважины, если в ней начальный уровень воды должен составлять $h_1 = 2{,}0$ м.

Принять коэффициент фильтрации грунта $k = 0{,}01$ см/с, использовать формулу (6.11).

Ответ: $L = 124$ м.

Задача 6.11. Определить двухсторонний максимально возможный приток воды Q_{max} к дренажной траншее длиной $l = 300$ м, глубиной $H = 1{,}5$ м и шириной $b = 1$ м, если водоносный грунт мощностью H – крупный песок, а средний гидравлический уклон составляет $i_{ср} = 0{,}005$.

Учесть, что Q_{max} соответствует динамическому напору $h = 0$.

Ответ: $Q = 1{,}13$ л/с.

РАЗДЕЛ 7

ГИДРОПРИВОД

Объемные гидромашины. Мощность на валу объемного насоса определяется по формуле

$$N_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{н}} p_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} = M_{\text{н}} \omega_{\text{н}}, \tag{7.1}$$

где $Q_{\text{н}}$ – подача насоса, м^3/с; $p_{\text{н}}$ – давление жидкости на выходе из насоса, Н/м^2; $\eta_{\text{н}}$ – полный КПД насоса; $M_{\text{н}}$ – момент на валу, Н·м; $\omega_{\text{н}} = 2\pi n_{\text{н}}$ – угловая скорость вала насоса, рад/с; $n_{\text{н}}$ – частота вращения вала, об/с.

Мощность на валу гидромотора (гидродвигателя)

$$N_{\text{д}} = Q_{\text{д}} p_{\text{д}} \eta_{\text{д}} = M_{\text{д}} \omega_{\text{д}}. \tag{7.2}$$

Аналогичные параметры, сопровождаемые индексами «н» и «д», означают, что они относятся либо к насосу, либо к гидромотору (гидродвигателю).

Подача насоса и расход гидромотора вычисляются по формулам:

$$Q_{\text{н}} = qnU\eta_{\text{о}} = w\omega U\eta_{\text{о}}; \; Q_{\text{д}} = qnU\frac{1}{\eta_{\text{о}}} = w\omega U\frac{1}{\eta_{\text{о}}}, \tag{7.3}$$

где q – рабочий объем гидромашины; $w = q/2\pi$ – удельный объем; U – параметр регулирования машины; $\eta_{\text{о}}$ – объемный КПД машины.

Моменты на валах гидромашин вычисляются по формулам:

$$M_{\text{н}} = \frac{q}{2\pi} pU\frac{1}{\eta_{\text{гм}}} = wpU\frac{1}{\eta_{\text{гм}}}; \tag{7.4}$$

$$M_{\text{д}} = \frac{q}{2\pi} pU\eta_{\text{гм}} = wpU\eta_{\text{гм}}. \tag{7.5}$$

Полный КПД гидромашины

$$\eta = \eta_о \eta_г \eta_м = \eta_о \eta_{гм}, \qquad (7.6)$$

где $\eta_г$, $\eta_м$ – гидравлический и механический КПД; $\eta_{гм}$ – гидромеханический КПД гидромашины.

Каталожное значение объемного КПД гидромашины, определяемое номинальными значениями давления и частоты вращения, будем обозначать для насоса $\eta^к_{он}$, а для гидромотора $\eta^к_{од}$.

Если параметры гидромашины отличаются от номинальных, то объемный КПД насоса вычисляется по формуле

$$\eta'_{он} = 1 - \left(1 - \eta^к_{он}\right) \frac{n^к_н p_н}{U n_н p^к_н}; \qquad (7.7)$$

КПД гидромотора

$$\eta'_{од} = \left[1 + \left(\frac{1}{\eta^к_{од}} - 1\right) \frac{n^к_д p_д}{U n_д p^к_д}\right]^{-1}, \qquad (7.8)$$

где $p_н$, $p_д$ и $n_н$, $n_д$ – текущие значения давления и частоты вращения насоса и двигателя.

Рабочие объемы гидромашин:

для поршневой гидромашины

$$q = \frac{\pi d^2}{4} s z m_р k, \qquad (7.9)$$

где d – диаметр поршня, см; s – ход поршня, см; z – число цилиндров; $m_р$ – число рядов; k – кратность работы каждого из цилиндров за один оборот ротора;

для радиально-поршневых гидромашин

$$s = 2e_о, \qquad (7.10)$$

где $e_о$ – эксцентриситет ротора, см;

для аксиально-поршневых гидромашин

$$s = D tg \alpha_о, \qquad (7.11)$$

где D – диаметр блока цилиндров, см; $\alpha_о$ – номинальный угол наклона шайбы;

для пластинчатых гидромашин однократного действия

$$q = 2eb(2\pi R - \delta z), \tag{7.12}$$

где R – радиус статора, см; δ – толщина пластин, см; b – ширина роторного блока, см; z – число пластин;

для пластинчатых насосов двукратного действия

$$q = 2b(R - r)\left[\pi(R + r) - \frac{\delta z}{\cos\alpha}\right], \tag{7.13}$$

где R и r – наибольший и наименьший радиусы статора; α – угол наклона пластины к радиусу;

для шестеренных гидромашин

$$q = 2\pi m d_{\text{о}} b, \tag{7.14}$$

где m – модуль зацепления; $d_{\text{о}}$ – диаметр начальной окружности шестерни; b – ширина шестерни;

для винтового насоса

$$q = izW, \tag{7.15}$$

где i – число заходов винта; z – число винтов; W – объем жидкости, заполняющей одну винтовую канавку на длине ее шага.

Гидравлические цилиндры. Из объемных гидродвигателей в системах гидропривода наиболее широкое применение получили гидравлические цилиндры поступательного движения. Усилие, развиваемое гидроцилиндром с односторонним штоком при его выдвижении под нагрузкой, определяется по формуле

$$T = ap_{\text{д}} - R_{\text{о}}, \tag{7.16}$$

где $p_{\text{д}}$ – давление жидкости в рабочей (поршневой) полости гидроцилиндра, МПа; $a = \pi D^2/4 - \pi f D H_{\text{у}}$ – эффективная площадь гидроцилиндра при рабочем ходе, мм^2; $R_{\text{о}}$ – доля внутреннего сопротивления движению поршня, не зависящая от внешней нагрузки, вычисляется по формуле (если две уплотняющие манжеты на поршне и одна – в крышке)

$$R_о = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} p_{сл} + \pi f D H_у \left(2 p_о + p_{сл}\right) + \pi f d h_у (p_o + p_{сл}), \quad (7.17)$$

D – диаметр цилиндра, мм; d – диаметр штока, мм; $p_о$ – монтажное давление на уплотняемой поверхности (МПа); $p_{сл}$ – давление в сливной линии, МПа; f – коэффициент трения движения резины по стали при обильной смазке; $H_у$ – ширина манжеты на поршне, мм; $h_у$ – ширина манжеты в крышке, мм.

В отдельных случаях применяют поворотные гидроцилиндры. Удельный объем таких двигателей определяется по формуле

$$w = \frac{R^2 - r^2}{2} \frac{\alpha}{360} b, \quad (7.18)$$

где R – радиус внутренней поверхности цилиндра, см; r – радиус поворотного ротора, см; b – ширина пластины, см; α – угол поворота ротора.

Объемные гидросистемы. Общий КПД гидропередачи может быть определен по формуле:

$$\eta_\Sigma = \frac{N_д}{N_н} = \eta_н \eta_с \eta_д = \frac{k}{u} = ki, \quad (7.19)$$

где $k = M_д / M_н$ – коэффициент трансформации момента гидропередачи; $u = \omega_н / \omega_д$ – передаточное число гидропередачи; i – ее передаточное отношение; $\eta_с$ – КПД трансмиссии (сети).

Коэффициент трансформации момента и передаточное число гидропередачи при объемном (машинном) регулировании насоса могут быть определены по формулам

$$k = \frac{q_д}{q_н} \frac{\eta_{\Sigma гм}}{U_н}; \quad (7.20)$$

$$u = \frac{q_д}{q_н} \frac{1}{U_н \eta_{\Sigma о}}, \quad (7.21)$$

где $\eta_{\Sigma гм} = \eta_{гмн}\eta_{гмд}\eta_{гс}$ – гидромеханический КПД привода; $\eta_{гс} = p_д/p_н$ – гидравлический КПД сети; $\eta_{\Sigma о} = \eta_{он}\eta_{од}\eta_{ос}$ – объемный КПД привода; $\eta_{ос} = Q_д/Q_н$ – объемный КПД сети,

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\Sigma о}\eta_{\Sigma гг}. \qquad (7.22)$$

Уравнение баланса расхода, используемое для определения статической механической характеристики гидропередачи, имеет вид

$$Q_{дт} = Q_{нт} - \Delta Q_{у}, \qquad (7.23)$$

где $Q_{нт}$ и $Q_{дт}$ – теоретические значения подачи насоса и расхода гидромотора; $\Delta Q_у = a_у p_н$ – суммарные утечки в гидросистеме; $a_у$ – коэффициент утечек.

Расход жидкости через управляемый дроссель привода определяется по формуле (если дроссель установлен параллельно двигателю)

$$Q_{др} = \mu f U_{др}\sqrt{\frac{2}{\rho}\left(p_д - p_{сл}\right)}, \qquad (7.24)$$

где $p_д$ – давление перед дросселем, определяемое на основе известной зависимости; $p_{сл}$ – давление в сливной линии дросселя; μ – коэффициент расхода дросселя; f – площадь проходного сечения дросселя при полном его открытии; $U_{др}$ – параметр регулирования (степень открытия) дросселя.

Гидродинамические передачи. Момент на валу насосного колеса гидродинамической передачи определяется по формуле

$$M_н = \rho Q_н\left(v_{1нu}R_{1н} - v_{2нu}R_{2н}\right), \qquad (7.25)$$

где $Q_н$ – теоретическая подача насосного колеса; $v_{нu}$ – проекция абсолютной скорости потока на переносную в насосном колесе гидромуфты на входе и выходе; R – радиус насосного колеса на входе и выходе.

Соотношение моментов насосного и турбинного колес *гидромуфты* определяется выражением

$$M_н = M_т. \qquad (7.26)$$

Гидравлический КПД гидромуфты зависит от ее передаточного отношения

$$\eta_{\text{г}} = i. \qquad (7.27)$$

Коэффициент момента гидромуфты определяется по формуле

$$\lambda_{\text{м}} = \frac{M}{\rho\omega^2 D^5}, \qquad (7.28)$$

где D – активный диаметр гидромуфты.

Безразмерная характеристика гидромуфты представляет собой зависимость $\lambda = \lambda(i)$, которая задается графически или таблично.

Приведенные характеристики *гидротрансформаторов* (гидродинамических передач с неподвижными лопастными колесами) имеют вид

$$k_{\text{м}} = k(i); \quad \lambda = \lambda(i); \quad \eta = \eta(i),$$

где $k_{\text{м}} = M_{\text{т}} / M_{\text{н}}$ – коэффициент трансформации момента.

КПД гидротрансформатора определяется по формуле (7.19).

ЗАДАЧИ

Задача 7.1. На рисунке показана схема гидропривода. Показание манометра $p_{\text{н}}$ = 4 МПа, мощность на валу насоса $N_{\text{н}}$ = 5 кВт. Приняв полный КПД насоса $\eta_{\text{н}}$ = 0,8, определить его подачу.

Решение. На основе формулы (7.1) находим

$$Q_{\text{н}} = \frac{N_{\text{н}}\eta_{\text{н}}}{p_{\text{н}}} = \frac{5\cdot 10^3\cdot 0{,}8}{4\cdot 10^6} = 10^{-3}\ \text{м}^3/\text{с} = 1\ \text{л/с} = 60\ \text{л/мин}.$$

Ответ: $Q_{\text{н}}$ = 60 л/мин.

Задача 7.2. Определить давление насоса, если двигатель при Q = 100 л/мин и $\eta_{\text{д}}$ = 0,8 развивает мощность N = 8 кВт. Потерями давления в сети и утечками пренебречь.

Ответ: $p_{\text{н}}$ = 6 МПа.

Задача 7.3. Пренебрегая потерями энергии в трубопроводе, определить мощность на валу гидромотора, если $p_д = 10$ МПа, $Q = 120$ л/мин, $\eta_д = 0{,}8$.

Ответ: $N_д = 16$ кВт.

Задача 7.4. Для условия задачи 7.3 и $N_д = 10$ кВт определить расход гидромотора.

Ответ: $Q = 75$ л/мин.

Задача 7.5. Какой момент развивает гидромотор при мощности $N_д = 6{,}3$ кВт и частоте вращения $n = 60$ об/мин?

Решение. В результате преобразования размерностей находим

$$\omega = 2\pi n/60 = 6{,}283\,\text{рад/с}; \quad N_д = 6{,}3\,\text{кВт} = 6300\,\text{Н}\cdot\text{м/с}.$$

По формуле (7.2)

$$M_д = \frac{N_д}{\omega_д} = \frac{6300}{6{,}283} = 1002{,}7 \text{ Н·м}.$$

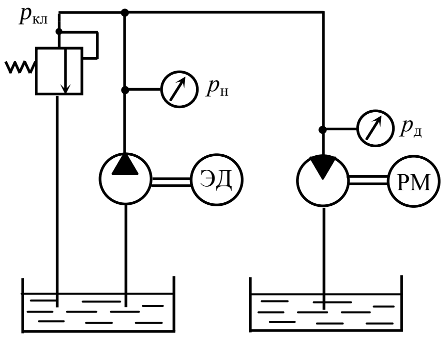
Ответ: $M_д = 1002{,}7$ Н·м.

Задача 7.6. Электродвигатель приводит в движение насос с частотой вращения $n = 1500$ об/мин, передавая на его вал мощность 10 кВт. Определить крутящий момент на валу насоса.

Ответ: $M_д = 63{,}7$ Н·м.

Задача 7.7. Момент сопротивления забоя, преодолеваемый исполнительным органом горной машины, который приводится в движение гидромотором, равен $M = 3000$ Н·м; его рабочий объем $q_д = 1$ л/об. Найти давление на выходе из насоса, если $\eta_д = 0{,}94$ и $\eta_c = 1$.

Ответ: $p_н = 20{,}04$ МПа.



К задачам 7.1-7.4, 7.12

Задача 7.8. Какой момент может развить гидромотор при рабочем объеме $q_д = 2{,}5$ л/об, давлении $p_д = 25$ МПа, гидромеханическом КПД, равном 0,91? Давление в сливной линии принять равным 1 МПа.

Ответ: $M_д = 8694$ Н·м.

Задача 7.9. Мощность на выходном валу гидропередачи 12 кВт при $\eta = 0{,}81$. Какую подачу должен развить насос, если его КПД равен 0,87, а давление на выходе 12 МПа?

Ответ: $Q = 64{,}4$ л/мин.

Задача 7.10. Найти полный КПД гидромашины, если известны гидромеханический КПД $\eta_{гм} = 0{,}94$ и объемный $\eta_о = 0{,}92$.

Ответ: $\eta = 0{,}865$.

Задача 7.11. КПД насоса имеют значения $\eta_{он} = 0{,}9$ и $\eta_{гмн} = 0{,}9$, а гидромотора $\eta_{од} = 0{,}95$ и $\eta_{гмд} = 0{,}85$. Определить КПД гидропередачи при $\eta_с = 1$.

Ответ: $\eta = 0{,}654$.

Задача 7.12. Предохранительный клапан гидропривода отрегулирован на давление $p_{кл} = 3{,}5$ МПа. Какой момент может развивать аксиально-поршневой гидромотор с диаметром поршней $d = 40$ мм, числом цилиндров в роторе $z = 7$, диаметром окружности по осям цилиндров $D = 124$ мм и углом наклона шайбы $\alpha_о = 30°$ при $\eta_{гмд} = 0{,}85$ и $\eta_с = 1$?

Ответ: $M = 298{,}2$ Н·м.

Задача 7.13. Для условия задачи 7.12 определить расход гидромотора при объемном КПД $\eta_{од} = 0{,}94$ и мощность на его валу при частоте вращения $n_д = 8$ об/мин.

Ответ: $Q_д = 5{,}36$ л/мин и $N_д = 249$ Вт.

Задача 7.14. Определить рабочий объем шестеренного насоса с модулем зацепления $m = 4$ мм, числом зубьев 12 и длиной зуба 27 мм.

Ответ: $q_н = 32{,}6$ см^3/об.

Задача 7.15. Определить подачу шестеренного насоса при частоте вращения $n = 1450$ об/мин, модуле зацепления $m = 6$ мм, числе зубьев шестерни $z = 12$, ширине зуба $b = 13$ мм и объемном КПД $\eta_{он} = 0{,}92$.

Ответ: $Q_н = 47$ л/мин.

Задача 7.16. Определить рабочий объем двухрядного радиально-поршневого гидромотора шестикратного действия, если его поршни имеют диаметр $d = 38$ мм, число цилиндров $z = 7$, а ход поршня $s = 22$ мм.

Ответ: $q_д = 2{,}096$ л/об.

Задача 7.17. Определить рабочий объем пятицилиндрового аксиально-поршневого насоса с диаметром поршней $d = 30$ мм, диаметром окружности, проходящей через оси поршней, $D = 140$ мм и углом наклона $\alpha = 30°$.

Ответ: $q_н = 285$ см^3/об.

Задача 7.18. Вычислить рабочий объем пластинчатого насоса однократного действия с десятью пластинами толщиной 2,5 мм, диаметром ротора $D = 160$ мм, длиной $b = 80$ мм и эксцентриситетом $e = 10$ мм.

Ответ: $q_н = 764{,}2$ см^3/об.

Задача 7.19. Определить рабочий объем пластинчатого насоса двукратного действия при максимальном радиусе статора $R = 120$ мм, минимальном $r = 100$ мм, числе пластин $z = 12$ толщиной $\delta = 2{,}5$ мм, длиной $b = 60$ мм и углом наклона к радиусу $\alpha = 10°$.

Ответ: $q_н = 1{,}586$ л/об.

Задача 7.20. КПД гидропередачи $\eta = 0{,}75$, передаточное число $u = 2$. Каков коэффициент трансформации момента?

Ответ: $k = 1{,}5$.

Задача 7.21. Определить рабочий объем пятиходового, двухрядного радиально-поршневого гидромотора с числом цилиндров в ряду $z = 9$, диаметром поршней $d = 35$ мм и глубиной профиля статора $S = 26{,}5$ мм.

Ответ: $q_д = 2{,}295$ л/об.

Задача 7.22. Определить рабочий объем 9-цилиндрового радиально-поршневого роторного насоса с диаметром поршней $d = 35$ мм и эксцентриситетом $e_о = 13{,}3$ мм.

Ответ: $q_н = 230{,}3$ см^3/об.

Задача 7.23. Определить рабочий объем пластинчатого насоса, если радиус статора $R = 56$ мм, ширина ротора $B = 25$ мм, эксцентриситет $e_о = 2{,}4$ мм, $z = 10$, $\delta = 1{,}5$ мм.

Ответ: $q_н = 40{,}4$ см^3/об.

Задача 7.24. Определить КПД гидропередачи, если коэффициент трансформации момента равен 23, а передаточное число 29.

Ответ: $\eta = 0{,}793$.

Задача 7.25. Определить удельный объем поворотного гидроцилиндра при его внутреннем радиусе $R = 100$ мм, радиусе ротора $r = 30$ мм и ширине пластины 60 мм; принять $\alpha = 360°$.

Ответ: $w = 273$ см^3.

Задача 7.26. Определить подачу трехвинтового насоса с двухзаходным винтом при объеме жидкости в канавке, равном 2,8 см^3, если частота вращения винта $n = 1470$ об/мин.

Ответ: $Q_н = 24{,}7$ л/мин.

Задача 7.27. Определить усилие T, создаваемое гидроцилиндром при выдвижении штока при рабочем давлении $p_д = 20$ МПа, давлении в сливной линии $p_{сл} = 1{,}5$ МПа и монтажном давлении резиновой манжеты $p_о = 2$ МПа, если диаметры поршня $D = 160$ мм и штока $d = 55$ мм, а ширина манжет $H_у = 18{,}7$ мм, $h_у = 8{,}1$ мм. Коэффициент трения движения резины по стали при обильной смазке $f = 0{,}03$.

Ответ: $T = 368$ кН.

Задача 7.28. Определить объемный КПД насоса в номинальном режиме $\eta_{\text{он}}^{\text{к}}$, если при повышении давления на выходе на 50 % он изменился до $0{,}9\,\eta_{\text{он}}^{\text{к}}$.

Ответ: $\eta_{\text{он}}^{\text{к}} = 0{,}833$.

Задача 7.29. Определить объемный КПД гидромотора в номинальном режиме $\eta_{\text{од}}^{\text{к}}$, если при повышении давления на входе на 50 % он изменился на 10 %.

Ответ: $\eta_{\text{од}}^{\text{к}} = 0{,}778$.

Задача 7.30. Объемный КПД нерегулируемого насоса, работающего при давлении $p_{\text{н}}^{\text{к}} = 12$ МПа и частоте вращения $\eta_{\text{до}}^{\text{к}} = 1470$ об/мин, равен 0,9. Определить объемный КПД при давлении $p_{\text{н}}$ = 20 МПа и частоте вращения $n = 1000$ об/мин.

Ответ: $\eta'_{\text{он}} = 0{,}755$.

Задача 7.31. Определить, как изменится объемный КПД $p_{\text{но}}^{\text{к}} = 0{,}9$ гидромотора, если давление $p_{\text{д}}^{\text{к}}$ увеличилось с 10 до 15 МПа, а частота вращения уменьшилась вдвое.

Ответ: $\eta'_{\text{од}} = 0{,}75$.

Задача 7.32. Определить частоту вращения гидромотора с рабочим объемом $q_{\text{д}}$ = 400 см^3/об при давлении $p_{\text{д}}$ = 10,05 МПа, если шариковый переливной клапан настроен на давление $p_{\text{к}}$ = 10 МПа, а подача насоса Q = 3,333 л/с.

Диаметр шарика d = 10 мм, коэффициент расхода клапана μ = 0,7, жесткость пружины c = 4000 Н/м, плотность рабочей жидкости ρ = 860 кг/м^3. КПД не учитывать. Проходное сечение клапана $f = 2dx$, где x – смещение шарика от исходного положения.

Ответ: $n_{\text{д}}$ = 497,73 об/мин.

Задача 7.33. Определить объемный КПД насоса при угловой скорости 150 рад/с и давлении $p_н$ = 12 МПа, работающего при параметре регулирования U = 0,8. Паспортные данные насоса: $\omega_н^к = 157$ рад/с, $p_н^к = 20$ МПа и $\eta_{он}^к = 0{,}94$.

Ответ: $\eta'_{он} = 0{,}953$.

Задача 7.34. Определить объемный КПД гидромотора, вращающегося со скоростью $\omega_д$ = 18 рад/с и преодолевающего нагрузку M = 1200 Н·м. Паспортные данные гидромотора: $q_д^к = 700$ см^3/об, $\omega_д^к = 21$ рад/с, $p_д^к = 16$ МПа, $\eta_д^к = 0{,}85$, $\eta_{од}^к = 0{,}9$.

Ответ: $\eta'_{од} = 0{,}904$.

Задача 7.35. Определить объемный КПД насоса при угловой скорости 150 рад/с и давлении $p_н$ = 12 МПа при параметре регулирования $U_н$ = 0,8. Паспортные данные: $\omega_н^к = 157$ рад/с, $p_н^к = 20$ МПа, $\eta_{он}^к = 0{,}94$.

Ответ: $\eta'_{он} = 0{,}953$.

Задача 7.36. Определить утечку рабочей жидкости в гидромоторе с рабочим объемом $q_д$ = 1,6 л/об при угловой скорости 3,0 рад/с и объемном КПД $\eta_{од}$ = 0,9.

Ответ: ΔQ = 84,496 м^3/с.

Задача 7.37. Определить утечку рабочей жидкости из насоса с рабочим объемом $q_н$ = 60 см^3/об при угловой скорости 150 рад/с и объемном КПД, равном 0,92.

Ответ: ΔQ = 114,59 см^3/с.

Задача 7.38. Определить скорость движения поршня гидроцилиндра диаметром 60 мм при расходе рабочей жидкости Q = 12 л/мин и объемном КПД, равном 0,98.

Ответ: v = 4,159 м/мин.

Задача 7.39. Построить характеристику объемного насоса $p = p(Q)$ с рабочим объемом $q_н = 68$ см^3/об при $\omega_н = 152$ рад/с и $\eta_{он} = 0{,}93$ при $p_н^к = 20$ МПа.

Ответ: Прямая, соединяющая точки $Q = 98{,}7$ л/мин, $p = 0$ МПа и $Q = 91{,}8$ л/мин; $p = 20$ МПа.

Задача 7.40. Определить усилие на штоке гидроцилиндра при $D_п = 63$ мм и $d_п = 45$ мм, давлении в штоковой полости $p_д = 16$ МПа, на сливе 1,5 МПа. Учесть внутренние сопротивления манжет [12] и монтажное давление 2 МПа. Принять коэффициент трения резины по стали $f = 0{,}05$.

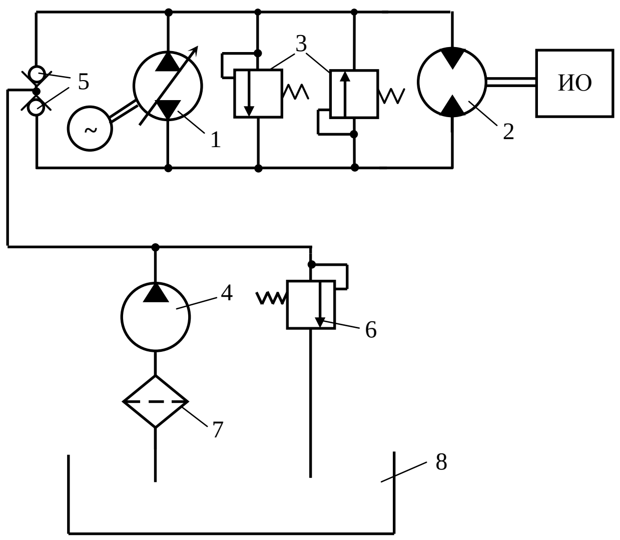
Ответ: $T = 16{,}496$ кН.

Задача 7.41. Построить механическую характеристику объемной передачи с гидромотором ($q_д = 700$ см^3/об; $p_д^к = 20$ МПа; $\eta_д^к = 0{,}85$; $\eta_{од}^к = 0{,}9$; $\omega_д^к = 20$ рад/с) и насосом ($q_н = 60$ см^3/об; $\eta_{он}^к = 0{,}94$; $\omega_н^к = 152$ рад/с) при $\eta_с = 1$.

Задача 7.42. Подача очистного комбайна осуществляется при помощи объемного гидропривода. Реверсивный и регулируемый насос 1 подает рабочую жидкость в реверсивный гидромотор 2, приводящий в движение подающую часть. Частота вращения изменяется при помощи параметра регулирования $U_н$. Для предохранения от перегрузок установлены предохранительные клапаны 3. Утечки в системе компенсируются подпиточным насосом 4 через обратные клапаны 5. Давление подпитки поддерживается постоянным и равным давлению в сливной линии гидромотора 2. Для очистки масла используется фильтр 7.

Выбрать элементы гидропривода (насосы 1 и 4, гидромотор 2 [12], клапаны 3, 5 и 6, бак 8 и фильтр 7) по заданным значениям момента на валу двигателя $M_д$ и его частоте вращения $n_д$.

Рассчитать и построить механическую характеристику привода $n_д = f_1(M_д)$ при $U_н = 1$ и его скоростную характеристику



К задаче 7.42

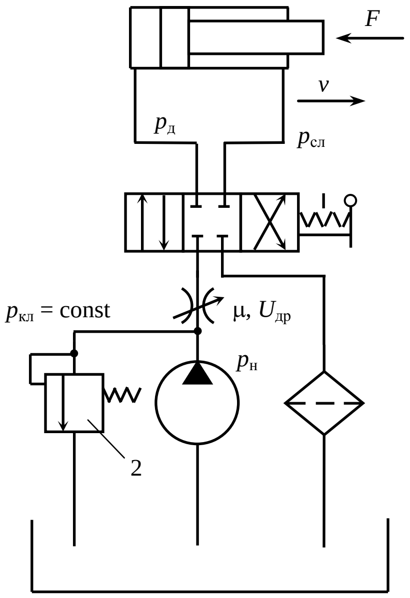
$n_д = f_2(U_н)$ при $M_д = \text{const}$ и изменении параметра регулирования в диапазоне $-1 \le U_н \le +1$. Выбрать электродвигатели основного и подпиточного насосов.

При расчетах силами инерции при разгоне привода пренебречь. Исходные для расчетов данные принимать в соответствии с табл.7.1 (номер варианта задается преподавателем).

Таблица 7.1

Номер варианта	$n_д$, об/мин	$M_д$, кН·м
1	20	50
2	25	45
3	30	40
4	35	35
5	40	30
6	45	25

Задача 7.43. Для незамкнутой системы гидропривода определить проходное сечение последовательно установленного дросселя при полном его открытии $U_{др} = 1$ и построить механическую характеристику $v = f(F)$ для трех значений $U_{др} = 1;\ 0{,}8;\ 0{,}5$, если при номинальной нагрузке $F_н$ давление в цилиндре $p_д = 5$ МПа, переливной клапан 2 настроен на давление $p_к = 5{,}5$ МПа, плотность жидкости $\rho = 900$ кг/м^3, коэффициент расхода дросселя $\mu = 0{,}65$, давление на сливе $p_{сл} = 0{,}15$ МПа. Скорость поршня при номинальной нагрузке $v_н$. Принять $\eta_{гмд} = 1$ и $\eta_{гпо} = 1$.



К задаче 7.43

Исходные данные принять в соответствии с табл.7.2 (номер варианта задается преподавателем).

Таблица 7.2

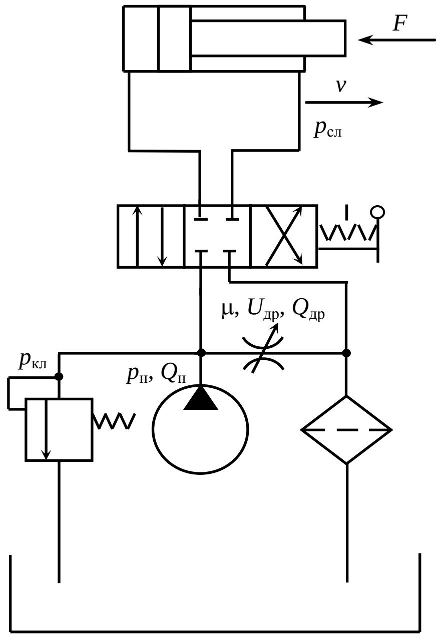
Номер варианта	$F_н$, кН	$v_н$, м/мин
1	50	4
2	44	5
3	40	5,5
4	35	6
5	30	6,5

Задача 7.44. Механизм подачи бурильной установки, работая на масле плотностью $\rho = 860$ кг/м^3, развивает усилие F. Определить площадь параллельно установленного регулируемого дросселя ($\mu = 0{,}7$), если при закрытых предохранительном клапане и распределителе вся подача насоса с рабочим объемом $q_н = 10$ см^3/об, частотой вращения $n_н = 1500$ об/мин и $\eta_{он} = 0{,}9$ при $U_{др} = 1$ уходит на слив.

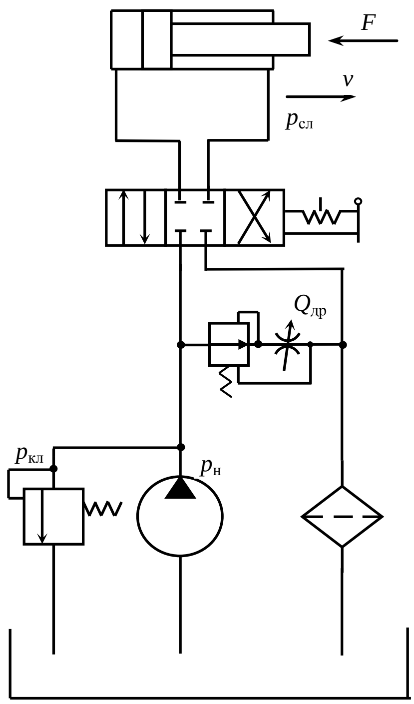
Принять диаметр поршня $D_п = 80$ мм, давление в сливной линии $p_{сл} = 0{,}5$ МПа, $\eta_{гмд} = 0{,}9$. Построить механические характеристики привода при степенях открытия дросселя $U_{др} = 0{,}3$; 0,4; 0,5. $F = 5\cdot10^4$; $6\cdot10^4$; $7\cdot10^4$; $8\cdot10^4$ и $10\cdot10^4$.

Задача 7.45. Используя исходные данные задачи 7.44, построить механическую характеристику $v = f(F)$ гидропривода, заменив регулируемый дроссель на дроссель-регулятор с $Q^{к}_{д-р} = 2{,}25\cdot10^{-4}$ м^3/с.

Задача 7.46. Определить активный диаметр гидромуфты, подобной заданной, при коэффициенте момента $\lambda_м = 0{,}062$, рабо-



К задаче 7.44



К задаче 7.45

тающей при параметрах, указанных в табл.7.2 (номер варианта задается преподавателем).

Таблица 7.2

Номер варианта	Момент, Н·м	Марка масла	Плотность ρ, кг/м^3	Частота вращения насоса, с$^{-1}$
1	200	Турбинное	901	25
2	300	Веретенное	892	16
3	400	Индустриальное 12	880	25
4	500	Трансформаторное	884	20
5	600	Трансформаторное	884	25
6	700	Турбинное	901	50
7	800	Индустриальное 12	880	48
8	900	Веретенное	892	24
9	1000	Турбинное	901	24,5
10	1200	Трансформаторное	884	16

Ответ: для варианта 1 D = 107,3 мм.

Рекомендательный библиографический список

1. *Гейер В.Г.* Гидравлика и гидропривод: Учебное пособие для вузов / В.Г.Гейер, В.С.Дулин, А.Н.Заря. М.: Недра, 1991. 331 с.

2. *Гудилин Н.С.* Гидравлика и гидропривод: Учебник для вузов / Н.С.Гудилин, Е.М.Кривенко, Б.С.Маховиков, И.Л.Пастоев (под общей редакцией И.Л.Пастоева). М.: МГГУ, 1996. 520 с.

3. Задачник по гидравлике и гидроприводу для студентов горных специальностей / Ю.Н.Гуляев, О.В.Кабанов, Б.С.Маховиков. Л., ЛГИ, 1989. 98 с.

4. *Павловский Н.Н.* Гидравлический справочник. М.-Л.; ОНТИ: 1937.

5. Примеры расчетов по гидравлик: Учебное пособие для вузов. / Под ред. А.Д.Альтшуля. М.: Стройиздат, 1976. 255 с.

6. Сборник задач по гидравлике / В.А.Большаков, В.Н.Попов и др. Киев: Вища школа, 1975. 300 с.

7. Сборник задач по машиностроительной гидравлике: Учебное пособие для вузов / Под ред. И.И.Куколевского и Л.Г.Подвидза. М.: Машиностроение, 1972. 471 с.

8. Справочник машиностроителя (в шести томах) / Под ред. Н.С.Ачеркана М.: Машгиз, 1955. Том 2. 559 с.

9. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Под общ. ред. Б.Б.Некрасова. Минск: Высшая школа, 1985. 382 с.

10. Справочник по гидроприводам горных машин / В.Ф.Ковалевский и др. М.: Недра, 1973. 504 с.

11. *Френкель Н.З.* Гидравлика: Учебник для вузов. М.; Госэнергоиздат, 1956. 456 с.

12. *Свешников В.К.* Станочные гидроприводы: Справочник. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ