Т. П. Троян

Г И Д Р А В Л И К А

ЗАДАЧИ И ПРИМЕРЫ РАСЧЁТОВ ПО ГИДРОСТАТИКЕ И ГИДРОДИНАМИКЕ

Омск
Издательство СибАДИ
2006

Учебное издание

ТРОЯН ТАМАРА ПЕТРОВНА

ГИДРАВЛИКА. ЗАДАЧИ И ПРИМЕРЫ РАСЧЁТОВ ПО ГИДРОСТАТИКЕ И ГИДРОДИНАМИКЕ

Учебное пособие

Главный редактор М. А. Тихонова

Подписано к печати 23.10.2006
Формат 60х90 1/16. Бумага писчая
Оперативный способ печати
Гарнитура Таймс
Усл. п. л. 5,75, уч.-изд. л. 5,6
Тираж 200 экз. Заказ
Цена договорная

Издательство СибАДИ
644099, Омск, ул. П. Некрасова, 10
Отпечатано в ПЦ издательства СибАДИ
644099, Омск, ул. П. Некрасова, 10

Федеральное агентство по образованию
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия
(СибАДИ)

Т. П. Троян

Г И Д Р А В Л И К А

ЗАДАЧИ И ПРИМЕРЫ РАСЧЁТОВ ПО ГИДРОСТАТИКЕ И ГИДРОДИНАМИКЕ

Учебное пособие

Допущено УМО вузов РФ по образованию в области железнодорожного транспорта и транспортного строительства в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобильные дороги и аэродромы» направления подготовки «Транспортное строительство»

Омск
Издательство СибАДИ
2006

УДК 625.72
ББК 39.311-021
Т 76

Рецензенты:

кафедра «Гидрогеология, гидравлика и инженерная гидрология» ОмГАУ;

доктор техн. наук, профессор СибАДИ Н. С. Галдин.

Троян Т. П.

Гидравлика. Задачи и примеры расчётов по гидростатике и гидродинамике: Учебное пособие. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. – 92 с.

Настоящее учебное пособие составлено применительно к учебной программе дисциплины «Гидравлика» для дорожно-строительных (транспортное направление) и строительных специальностей высших учебных заведений и колледжей. Оно включает основы гидростатики и гидродинамики, сведения о движении жидкости через отверстия, насадки, трубопроводы, содержит справочные и нормативные материалы.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения по специальностям 270205 «Автомобильные дороги и аэродромы», 270201 «Мосты и транспортные тоннели», 280202 «Инженерная защита окружающей среды», 080502 «Экономика и управление на предприятии (дорожное хозяйство)».

Ил. 81. Табл. 20. Библиогр.: 10 назв.

ISBN 5-93204-307-5

П., 2006

Т.П. ТРОЯН

Г И Д Р А В Л И К А

ЗАДАЧИ И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ПО ГИДРОСТАТИКЕ И ГИДРОДИНАМИКЕ

ОМСК – 2006

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие написано на основе многолетнего опыта преподавания курса «Гидравлика» в Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ). Издание пособия вызвано необходимостью выполнения требований агентства по образованию РФ в части формирования фондов библиотек вузов с учётом степени устареваемости литературы, а также изменением учебных планов в сторону увеличения самостоятельной работы студентов.

Настоящее учебное пособие составлено применительно к учебной программе дисциплины «Гидравлика» для дорожно-строительных и строительных специальностей высших учебных заведений и колледжей: «Автомобильные дороги и аэродромы», «Мосты и транспортные тоннели», «Промышленное и гражданское строительство» и др. Пособие может быть использовано также студентами других специальностей («Инженерная защита окружающей среды», «Экономика и управление на предприятии (строительство)» и др.), для которых учебными программами не предусматривается отдельного курса гидравлики, но изучение этого предмета даётся в соответствующих дисциплинах: «Гидравлика и теплотехника», «Гидравлика и инженерная гидрология», «Гидравлика, насосы и компрессоры» и др.

Настоящее учебное пособие рекомендуется и студентам-заочникам при выполнении контрольных и курсовых работ и подготовке к зачёту и экзамену.

В учебном пособии использованы основные методики расчётов, расчетные формулы и таблицы, приведённые в учебнике для студентов транспортных специальностей строительного профиля Н. М. Константинова, Н. А. Петрова, Л. И. Высоцкого «Гидравлика, гидрология, гидрометрия», в учебнике для вузов А. Д. Гиргидова «Механика жидкости и газа (гидравлика)», в учебнике для вузов Р. Р. Чугаева «Гидравлика», в «Справочнике по гидравлическим расчётам» под редакцией П. Г. Киселёва, а также в нормативных документах, пособиях и рекомендациях по гидравлическим расчётам.

Автором учтены замечания кафедры «Гидрогеология, гидравлика и инженерная гидрология» ОмГАУ и её руководителя канд. техн. наук, доц. Ж. А. Тусупбекова. Особую благодарность автор выражает канд. техн. наук, доц. Д. С. Рассказову (СибАДИ), канд. техн. наук, доц. В. Н. Туркину (ОмГАУ), д-ру техн. наук, проф. Н.С. Галдину (СибАДИ), д-ру техн. наук, проф. В. В. Сиротюку (СибАДИ), замечания и советы которых, улучшили настоящее издание. Автор признателен Н. Н. Дудко и А. Бурмистрову, оказавшим большую помощь при оформлении пособия.

Введение

Гидравлика – механика жидкости – является общепрофессиональоной дисциплиной, при изучении которой студенты знакомятся с физическими свойствами жидкости, основными законами кинематики, гидростатики и гидродинамики, теоретическими основами ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости и др.

Гидравлика содержит большое число опытных коэффициентов, эмпирических и полуэмпирических формул, методика применения которых, а также их физический смысл хорошо осваиваются в процессе решения различных задач. Поэтому каждый раздел пособия содержит краткое изложение теории вопроса и формулы с тем, чтобы разбор примеров расчётов производился студентом осознанно, с закреплением теоретических знаний. Основные понятия и термины приводятся не в алфавитном порядке, а по ходу изложения материала в логической последовательности.

Задачи на физические свойства жидкостей, задачи по гидростатике и гидродинамике являются общими для многих инженерных специальностей. Для их решения необходимо знание различных систем единиц измерения физических величин (табл. 1) и соотношения между ними.

Таблица 1

Таблица единиц в различных системах

Единицы	СИ (международная)	МКГСС (техническая)	СГС (физическая)	Внесистемная
Длина	м	м	см	дюйм, км
Масса	кг	кгс·с^2/м	г	т (тонна)
Время	с	с	с	сут (сутки)
Площадь	м^2	м^2	см^2	км^2, га (гектар)
Объём	м^3	м^3	см^3	л (литр)
Скорость	м/с	м/с	см/с	
Плотность	кг/м^3	кгс·с^2/м^4	г/см^3	т/м^3
Сила	Н (ньютон)	кгс(килограмм-сила)	дина	- -
Давление	Па (паскаль)	кгс/м^2	дин/см^2	ат (атмосфера)
Динамическая вязкость	Па·с	кгс·с/м^2	П (пуаз)	сантиП (сантипуаз)
Кинематическая вязкость	м^2/с	м^2/с	Ст (стокс)	сантиСт (сантистокс)
Массовый расход	кг/с	кгс·с/м	г/с	т/с
Объёмный расход	м^3/с	м^3/с	см^3/с	л/с, м^3/сут
Удельный вес (объёмный вес)	Н/м^3	кгс/м^3	дин/см^3	кгс/дм^3

1 дина = 1 г · 1 см/с^2 = 1 г·см/с^2.
1 Н = 1 кг · 1 м/с^2 = 1 кг·м/с^2 = 10^5 дин.
1 кгс = 1 кг · 9,81 м/с^2 = 9,81 кг·м/с^2 = 9,81 Н = 9,81·10^5 дин.
1 Па = 1 Н/м^2.
1 ат = 1 кгс/см^2 = 9,81·10^4 Н/м^2 ≈ 10^5 Па = 0,1 МПа.
1" = 1 дюйм = 2,54 см = 2,54·10^{-2} м.
1 т = 1000 кг = 10^6 г.
1 сут = 86 400 с.
1 га = 10^4 м^2 = 10^8 см^2.
1 л = 1 дм^3 = 10^{-3} м^3 = 10^3 см^3.
1 П = 1 дин·с/см^2.
1 Ст = 1 см^2/с.

Ускорение свободного падения g принимается в обычных технических расчётах равным 9,81 м/с^2. Числовое значение g указывает на достаточную точность величин, получаемых в результате решения гидравлических задач: с точностью до 0,01.

При написании гидравлических формул и уравнений, а также обозначений часто применяют буквы греческого алфавита, названия которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Буквы греческого алфавита

Буква	Название буквы	Буква	Название буквы	Буква	Название буквы	Буква	Название буквы
α	альфа	θ	тэта	ρ	ро	Γ	гамма
β	бета	κ	каппа	σ	сигма	Δ	дельта
γ	гамма	λ	ламбда	τ	тау	Λ	ламбда
δ	дельта	μ	мю	φ	фи	Σ	сигма
ε	эпсилион	ν	ню	χ	хи	Φ	фи
ζ	дзета	ξ	кси	ψ	пси	Ψ	пси
η	эта	π	пи	ω	омега	Ω	омега

В целях экономии времени студентов в пособии приводится минимально необходимый справочный и нормативный материал для решения задач.

Ответы на все задачи приводятся непосредственно под условием задачи, что сокращает время на их отыскивание и позволяет студенту оценить правильность его решения.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

1.1. Основные понятия

Удельный вес γ есть вес жидкости в единице объёма:

$$\gamma = G / W, \tag{1.1}$$

где G – вес однородной жидкости; W – объём, занимаемый жидкостью.

Удельный вес пресной воды при температуре 4 °С равен 9 810 Н/м^3.

Плотность ρ есть масса жидкости в единице объёма:

$$\rho = m / W, \tag{1.2}$$

где m – масса однородной жидкости; W – объём, занимаемый жидкостью.

В гидравлических расчётах принимают плотность пресной воды равной 1000 кг/м^3, если не оговорены температурные условия. В табл. 3 приведены значения плотности воды при разных температурах.

Таблица 3

Плотность воды при разных температурах

Температура t, °С	Плотность ρ, кг/м^3	Температура t, °С	Плотность ρ, кг/м^3	Температура t, °С	Плотность ρ, кг/м^3
0	999,87	30	995,67	70	977,81
4	1000	40	992,24	80	971,83
10	999,73	50	988,79	90	965,34
20	998,23	60	983,24	99	959,09

Известно, что

$$G = mg, \tag{1.3}$$

где g – ускорение свободного падения (для гидравлических расчётов принимается равным 9,81 м/с^2).

Таким образом, между удельным весом и плотностью существует связь

$$\gamma = \rho g. \tag{1.4}$$

Плотность смеси $\rho_{см}$ определяется по формуле

$$\rho_{см} = \frac{m_1 + m_2}{W_1 + W_2}, \tag{1.5}$$

или

$$\rho_{см} = \frac{\rho_1 W_1 + \rho_2 W_2}{W_1 + W_2}, \tag{1.6}$$

где m_1 и W_1 – соответственно масса и объём жидкости, находящейся в резервуаре, плотностью ρ_1; m_2 и W_2 – соответственно масса и объём дополнительно закачанной жидкости для получения смеси плотностью ρ_1.

Значения плотности капельных жидкостей при температуре 20 °С приведены в табл. 4.

Таблица 4

Плотность капельных жидкостей (при t = 20 °С) и некоторых газов (при t = 15 °С и p = 0,1 МПа)

Жидкость или газ	Плотность ρ, кг/м^3	Жидкость или газ	Плотность ρ, кг/м^3
Мазут обыкновенный	889–920	Красочные составы	900–1200
Мазут жидкий	929–938	Масло соляровое	879–889
Бензин авиационный	739–780	Масло минеральное	877–892
Битум	929–949	Нефть	760–900
Вода морская	1002–1030	Ртуть	13 550
Глицерин безводный	1250	Спирт этиловый (безводный)	790
Дёготь каменноугольный	1030	Штукатурные растворы	2000–2500
Керосин	792–860	Эфир этиловый	715–719
Воздух	1,21	Кислород	1,34
Водород	0,085	Углекислый газ	0,78

Сжимаемость – способность жидкости уменьшаться в объёме при увеличении давления – характеризуется коэффициентом объёмного сжатия β_W, который показывает относительное изменение объёма жидкости на единицу изменения давления:

$$\beta_W = \frac{1}{\Delta p}\frac{\Delta W}{W}, \qquad (1.7)$$

где W – первоначальный объём жидкости при атмосферном давлении; ΔW – уменьшение объёма жидкости при увеличении давления на Δp.

В гидравлических расчётах коэффициент объёмного сжатия для воды принимают равным $1/(20 \cdot 10^8)$ м^2/Н.

Величина, обратная коэффициенту объёмного сжатия, называется объёмным модулем упругости жидкости E:

$$E = 1 / \beta_W. \qquad (1.8)$$

Для воды объёмный модуль упругости $E \approx 2 \cdot 10^9$ Па.

Температурное расширение – способность жидкости изменяться в объёме при изменении температуры – характеризуется коэффициентом температурного расширения β_t, который выражает относительное изменение объёма жидкости при изменении температуры на один градус:

$$\beta_t = \frac{1}{\Delta t}\frac{\Delta W}{W}, \qquad (1.9)$$

где ΔW – изменение объёма, соответствующее изменению температуры на величину Δt.

Коэффициент температурного расширения капиллярных жидкостей изменяется незначительно, но в практике расчёта отопительных систем его учитывают. В расчётах для воды можно принимать $\beta_t \approx 1 \cdot 10^{-4}$ °С$^{-1}$.

Вязкость – способность жидкости оказывать сопротивление касательным усилиям, стремящимся сдвинуть одни частицы жидкости по отношению к другим. Сила внутреннего трения в жидкости (касательное напряжение) τ на единицу площади определяется по закону Ньютона:

$$\tau = \pm\mu \frac{du}{dy}, \tag{1.10}$$

где μ – динамическая вязкость жидкости; $\frac{du}{dy}$ – градиент скорости в направлении, перпендикулярном течению.

Значение динамической вязкости зависит от рода жидкости и её температуры. Динамическая вязкость μ измеряется в пуазах (П):

1 П = 1 дин·с/см^2 = 0,1 Па·с.

Отношение динамической вязкости жидкости к её плотности называется кинематической вязкостью ν:

$$\nu = \mu / \rho. \tag{1.11}$$

Кинематическая вязкость измеряется в стоксах (Ст):

1 Ст = 1 см^2/с = 10^{-4} м^2/с.

Вязкость жидкости практически не зависит от давления, но значительно уменьшается с увеличением температуры. В табл. 5 приведены значения динамической и кинематической вязкости воды.

Таблица 5

Динамическая и кинематическая вязкость воды при разных температурах

t, °С	μ, Па·с	ν·10^{-6}, м^2/с	t, °С	μ, Па·с	ν·10^{-6}, м^2/с	t, °С	μ, Па·с	ν·10^{-6}, м^2/с
0	0,00179	1,79	12	0,00124	1,23	20	0,00101	1,01
6	0,00147	1,47	14	0,00117	1,17	30	0,0008	0,81
8	0,00139	1,38	16	0,00112	1,11	40	0,00065	0,60
10	0,00131	1,31	18	0,00106	1,06	50	0,00055	0,56

В табл. 6 приведены значения кинематической вязкости некоторых жидкостей и газов.

Таблица 6

Кинематическая вязкость некоторых жидкостей (при t= 20 ˚С) и некоторых газов (при t = 15 ˚С и p = 0,1 МПа)

Жидкость или газ	$\nu\cdot10^6$, м^2/с	Жидкость или газ	$\nu\cdot10^6$, м^2/с
Анилин	4,3	Масло минеральное	313 – 1450
Бензин	0,83 – 0,93	Нефть	8,1 – 9,3
Вода пресная	1,01	Ртуть	0,11
Глицерин безводный	4,1	Воздух	14,5
Дизельное топливо	5,0	Водород	94,5
Керосин	2,0 – 3,0	Кислород	1,4
Красочные растворы	90 – 120	Углекислый газ	7,2

На практике вязкость жидкостей определяется вискозиметрами и чаще всего выражается в градусах Энглера (˚Е) – так называемая условная вязкость. Для перехода от условной вязкости в градусах Энглера (˚Е) к кинематической вязкости в стоксах (Ст) служит эмпирическая формула

$$\nu = 0{,}0731\cdot{}^{\circ}E - 0{,}0631\ /\ {}^{\circ}E. \qquad (1.12)$$

Если в задаче не оговариваются температурные условия, то значения кинематической и динамической вязкости принимаются при температуре 20 ˚С.

Идеальная жидкость – это воображаемая невязкая и несжимаемая абсолютно подвижная жидкость, не оказывающая сопротивления разрыву.

Реальная жидкость – жидкость, которая встречается в природе: вязкая и сжимаемая.

1.2. Примеры решения задач

Пример 1. Нефть весом 90 кгс занимает объём 10^5 см^3. Определить плотность и удельный вес этой нефти в трёх системах единиц (СИ, МКГСС, СГС).

Решение. Для определения плотности нефти воспользуемся формулой (1.4): $\gamma = \rho g$, отсюда $\rho = \gamma\ /\ g$.

Удельный вес определим по формуле (1.1): $\gamma\ = G\ /\ W$.

Для определения искомых величин в заданной системе единиц измерения необходимо помнить:

90 кгс = 90·9,81 Н = 90·9,81·10^5 дин;

10^5 см^3 = $10^5\cdot10^{-6}$ м^3.

$\gamma_{СИ} = 90\cdot9{,}81\ /\ (10^5\cdot10^{-6}) = 8829$ Н/м^3.

$\rho_{СИ} = 8829\ /\ 9{,}81 = 900$ Нс^2/м^4 = 900 кг/м^3.

$\gamma_{МКГСС}\ = 90\ /\ (10^5\cdot10^{-6}) = 900$ кгс/м^3.

$\rho_{МКГСС} = 900\ /\ 9{,}81 = 91{,}7$ кгс·с^2/м^4.

$\gamma_{СГС} = 90\cdot9{,}81\cdot10^5\ /\ 10^5 = 882{,}9$ дин/см^3.

$\rho_{СГС} = 882{,}9\ /\ (9{,}81\cdot10^2) = 0{,}9$ дин·с^2/см^4.

Пример 2. Трубопровод диаметром d = 250 мм и длиной L = 1 км заполнили водой при атмосферном давлении. Определить, какой объём воды необходимо добавить в трубопровод, чтобы давление в нём повысилось до 70 ат? Деформацией стенок трубопровода пренебречь.

Решение. Для определения необходимого объёма ΔW воспользуемся формулой (1.7), откуда

$$\Delta W = \beta_W \Delta p W .$$

Для воды β_W = 1/(20·10^8) м^2/Н. Изменение давления в трубопроводе равно Δp = 70 – 1 = 69 ат = 69·9,81·10^4 Па. Первоначальный объём воды в трубопроводе равен $W = (\pi d^2 / 4)L$, где d = 250 мм = 0,25 м, L = 1 км = =1000 м. Тогда

$$\Delta W = 69 \cdot 9{,}81 \cdot 10^4 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}25^2 \cdot 1000 /(20 \cdot 10^8 \cdot 4 \approx 0{,}16)\text{ м}^3.$$

Пример 3. При температуре 288 К плотность нефти равна 828 кг/м^3. При температуре 295 К условная вязкость нефти равна 6,4 ˚Е. Коэффициент температурного расширения нефти β_t = 0,00072 1/ К. Определить динамическую вязкость нефти при температуре 295 К.

Решение. Динамическую вязкость можно определить из формулы (1.11):

$$\mu_{295} = \nu_{295} \cdot \rho_{295}.$$

Кинематическая вязкость определяется по формуле (1.12)

ν_{295} = 0,0731·6,4 – 0,0631/6,4 = 0,458 см^2/с = 0,458·10^{-4} м^2/с.

Плотность нефти при температуре 295 К можно определить из формулы (1.9), выразив объём W из формулы (1.2):

$$W_{288} = m / \rho_{288}.$$

$$\Delta W = W_{288} - W_{295} = \frac{m}{\rho_{288}} - \frac{m}{\rho_{295}} = \frac{m \cdot (\rho_{295} - \rho_{288})}{\rho_{288} \cdot \rho_{295}}.$$

$$\beta_t = \frac{\Delta W}{\Delta t \cdot W} = \frac{m \cdot (\rho_{295} - \rho_{288}) \cdot \rho_{288}}{\Delta t \cdot m \cdot \rho_{288} \cdot \rho_{295}} = \frac{\rho_{295} - \rho_{288}}{\Delta t \cdot \rho_{295}}.$$

$$\rho_{295} = \frac{\rho_{288}}{1 - \beta_t \cdot \Delta t} = \frac{828}{1 - 0{,}00072 \cdot (288 - 295)} = 823{,}85\text{ кг/м}^3.$$

μ_{295} = 0,458·10^{-4}·823,85 = 0,0377 Н·с/м^2.

1.3. Задачи

1.3.1. Определить плотность нефти, если 320 000 кг её массы помещаются в объёме 380 м^3.

Ответ: 842 кг/м^3.

1.3.2. Определить объём, занимаемый 125 000 кг нефти, если её плотность равна 850 кг/м^3.

Ответ: 147 м^3.

1.3.3. Определить удельный вес и плотность жидкости, если её объём $W = 10^4$ см^3 имеет вес $G = 8{,}3$ кгс. Решение привести в трёх системах единиц: международной – СИ, технической – МКГСС, физической – СГС.

Ответ: $\gamma_{си} = 8142{,}3$ Н/м^3; $\rho_{си} = 830$ кг/м^3; $\gamma_т = 830$ кгс/м^3; $\rho_т = 84{,}6$ кгс·с^2/м^4; $\gamma_ф = 846$ дин/см^3; $\rho_ф = 0{,}86$ г/см^3.

1.3.4. Определить потребное число бочек для транспортировки трансформаторного масла весом 117 кН и плотностью 900 кг/м^3, если объём одной бочки $W_б = 1{,}2$ м^3.

Ответ: 10 шт.

1.3.5. Определить плотность битума, если 470 кН его занимают объём $W = 50$ м^3.

Ответ: 940 кг/м^3.

1.3.6. При гидравлическом испытании трубопровода длиной 600 м и диаметром 500 мм давление воды поднято от 1 ат до 50 ат. Какой объём воды потребовалось подать в трубопровод за время подъёма давления? Расширением стенок трубы пренебречь.

Ответ: 0,26 м^3.

1.3.7. Сосуд, объём которого 2,0 м^3, заполнен водой. На сколько уменьшится и чему станет равным объём воды при увеличении давления на 20 000 кПа? Модуль объёмной упругости воды принять равным $1962 \cdot 10^6$ Па.

Ответ: 0,02 м^3; 1,98 м^3.

1.3.8. При испытании прочности 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 объём воды, вытекшей за время испытания. Объём резервуара равен 20 м^3.

Ответ: 0,04 м^3.

1.3.9. Кинематическая вязкость воды при температуре 15 °С равна 0,0115 Ст. Определить динамическую вязкость жидкости в международной, технической и физической системах единиц.

Ответ: $\mu_{си} = 1{,}15 \cdot 10^3$ Па·с.

1.3.10. Удельный вес бензина 720 кгс/м^3. Определить плотность этого бензина в международной, технической и физической системах единиц.

Ответ: $\rho_{си}$ = 720 кг/м^3.

1.3.11. Определить удельный вес и плотность жидкости, если её вес 90 кгс и объём 10^5 см^3. Решение дать в международной, технической и физической системах единиц.

Ответ: $\gamma_{си}$ = 8829 Н/м^3; $\rho_{си}$ = 900 кг/м^3.

1.3.12. Плотность нефти 0,86 г/см^3. Определить плотность и удельный вес этой нефти в международной и технической системах единиц.

Ответ: $\gamma_{си}$ = 8436,6 Н/м^3; $\rho_{си}$ = 860 кг/м^3.

1.3.13. Удельный вес бензина 7000 Н/м^3. Определить плотность и удельный вес этого бензина в международной, технической и физической системах единиц.

Ответ: $\rho_{си}$ = 740 кг/м^3.

1.3.14. 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 в международной, технической и физической системах единиц.

Ответ: $\rho_{си}$ = 816 кг/м^3.

1.3.15. В резервуар залито 15 м^3 жидкости плотностью 800 кг/м^3. Сколько необходимо долить такой же жидкости (однородной), но плотностью 824 кг/м^3, чтобы в резервуаре образовалась смесь плотностью 814 кг/м^3?

Ответ: 21 м^3.

1.3.16. Стальной толстостенный баллон, объём которого 36 дм^3, заполнен нефтью и плотно закрыт при атмосферном давлении. Какое количество нефти необходимо закачать в баллон дополнительно, чтобы давление в нём повысилось в 25 раз? Модуль объёмной упругости нефти равен $1325 \cdot 10^6$ Па. Деформацией стенок баллона пренебречь.

Ответ: 65 см^3.

1.3.17. Сосуд ёмкостью 32 л заполнен жидкостью при атмосферном давлении. Вычислить объём жидкости, который необходимо закачать в сосуд для того, чтобы избыточное давление в нём было равно 10 атм. Деформациями стенок сосуда пренебречь. Модуль объёмной упругости для жидкости принять равным 13 500 кгс/см^2.

Ответ: 0,24 м^3.

1.3.18. Один кубический метр нефти имеет массу 0,92 т. Вычислить удельный вес и плотность нефти в физической и технической системах единиц.

Ответ: $\rho_ф = 0,92$ г/см^3; $\rho_т = 920$ кг/м^3.

1.3.19. В резервуар залито 20 000 л нефти плотностью 850 кг/м^3 и $25 \cdot 10^3$ л плотностью 840 кг/м^3. Определить плотность смеси.

Ответ: 844,4 кг/м^3.

1.3.20. В резервуар залито 27 400 л нефти с удельным весом 840 кгс/м^3 и 18 900 л нефти с неизвестным удельным весом. Полученная смесь имеет удельный вес 860,4 кгс/м^3. Вычислить неизвестный удельный вес.

Ответ: 890 кгс/м^3.

1.3.21. Определить кинематическую и динамическую вязкость при плотности жидкости 0,9 г/см^3. Показания вискозиметра по Энглеру 40°.

Ответ: 2,92 Ст; 2,63 П.

1.3.22. Кинематическая вязкость нефти 0,4 Ст, а удельный вес равен 9000 Н/м^3. Определить динамическую вязкость нефти в международной, технической и физической системах единиц.

Ответ: $3,7 \cdot 10^{-3}$ П.

1.3.23. Вязкость нефти, определённая при помощи прибора Энглера, равна 8,5 ˚Е. Определить динамическую вязкость в технической системе единиц, если удельный вес нефти составляет 8 500 Н/м^3.

Ответ: 0,005 кгс·с/м^2.

1.3.24. Резервуар диаметром 700 мм и высотой 1,2 м имеет массу 10 кг. Определить вес резервуара, заполненного водой при температуре 4 ˚С. Ответ дать в международной системе единиц.

Ответ: 561 Н.

1.3.25. Вязкость цилиндрового масла 50 ˚Е, удельный вес 900 кгс/м^3. Определить динамическую и кинематическую вязкость цилиндрового масла в международной, технической и физической системах единиц.

Ответ: $\mu_ф = 3,28$ П; $\nu_ф = 3,65$ Ст.

1.3.26. При 20 ˚С кинематическая вязкость глицерина 8,7 Ст, удельный вес 1260 кгс/м^3. Вычислить при этой температуре динамическую вязкость глицерина в технической и физической системах единиц.

Ответ: $\mu_ф = 10,96$ П.

1.3.27. Кинематическая вязкость воды при температуре 15 °С равна 0,0115 Ст. Определить динамическую вязкость воды в физической и технической системах единиц. Как изменится вязкость воды при подогреве её до 60 °С.

Ответ: $1{,}17 \cdot 10^{-4}$ П; в 2,4 раза.

1.3.28. При температуре 500 °С и атмосферном давлении водяной пар имеет плотность 0,028 кгс·с^2/м^4. Вычислить его удельный объём при этой температуре.

Ответ: 3,64 м^3/кгс.

1.3.29. Сколько будет весить ёмкость объёмом 200 л, если её заполнить водой плотностью 1000 кг/м^3? Собственный вес ёмкости 10 кгс. Ответ дать в международной системе единиц.

Ответ: 2060 Н.

1.3.30. Динамическая вязкость воздуха при температуре 0 °С равна $17{,}0 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Определить кинематическую вязкость воздуха в системе единиц СГС, если удельный вес равен 12,3 Н/м^3.

Ответ: 0,16 Ст.

2. ГИДРОСТАТИКА

2.1. Основные понятия

Гидростатическим давлением (г.с.д.) называют предел отношения силы ΔP, действующей на элементарную площадку, к площади этой площадки $\Delta\omega$, которая, в свою очередь, стремится к нулю:

$$p = \lim_{\Delta\omega \to 0} \frac{\Delta P}{\Delta\omega}. \qquad (2.1)$$

Г.с.д. характеризует внутреннее напряжение сжатия и обладает следующими свойствами:

1) г.с.д. всегда направлено по внутренней нормали к площадке действия;

2) г.с.д. в любой точке жидкостной системы по всем направлениям одинаково, т. е. не зависит от ориентации в пространстве площадки, на которую оно действует.

Абсолютное (или полное) гидростатическое давление p_A в данной точке по ***основному уравнению гидростатики*** равно

$$p_A = p_0 + \rho g h_A, \qquad (2.2)$$

где p_0 – ***поверхностное давление*** (давление на свободной поверхности жидкости); $\rho g h_A$ – ***весовое давление*** (вес столба жидкости высотой h_A с площадью поперечного сечения, равной единице); ρ – плотность жидкости;

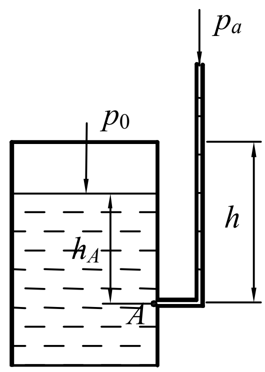


Рис.1. Схема к основному уравнению гидростатики

g–ускорение свободного падения; h_A– глубина погружения данной точки под свободную поверхность (рис.1).

Избыточное давление (манометрическое) представляет собой разность между абсолютным давлением и атмосферным:

$$p = p_A - p_a\,. \tag{2.3}$$

В обычных технических расчётах ***атмосферное давление*** p_a принимают равным одной технической атмосфере (1 ат = 1 кгс/см^2). В случае, когда поверхностное давление равняется атмосферному ($p_0 = p_a$), избыточное давление определяется по формуле

$$p = \rho g h\,. \tag{2.4}$$

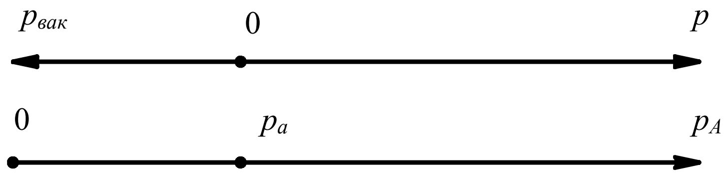


Рис. 2. Пояснения к определениям избыточного давления и вакуума (p и $p_{вак}$)

Пьезометр – простейший прибор, измеряющий избыточное давление, представляет собой тонкую стеклянную трубку, верхний конец которой открыт в атмосферу, а нижний присоединён к резервуару (см. рис. 1) или трубопроводу. Диаметр пьезометра должен быть не менее 8 ÷ 10 мм во избежание значительного капиллярного поднятия.

Пьезометрическая высота (высота поднятия жидкости в пьезометре) определяется из формулы (2.4)

$$h = p / \rho g\,. \tag{2.5}$$

Манометр – это более сложный прибор, предназначенный для измерения избыточного давления.

Вакуумметрическим давлением*,* или ***вакуумом***, называют недостачу абсолютного давления до атмосферного, т.е. разность между атмосферным давлением и абсолютным (рис. 2):

$$p_{вак} = p_a - p_A\,. \tag{2.6}$$

В основном гидростатическое давление измеряется напряжением (Па), в технических атмосферах (ат), высотой жидкостного столба (м, мм).

Сила гидростатического давления на плоскую стенку произвольной формы равна произведению давления в центре тяжести этой стенки на её площадь. В общем случае формула для определения силы имеет вид

$$P = \left(p_0 + \rho g h_c\right) \cdot \omega, \qquad (2.7)$$

где ω – площадь данной плоской стенки, смоченная жидкостью; h_c – глубина погружения центра тяжести смоченной плоской стенки под свободную поверхность.

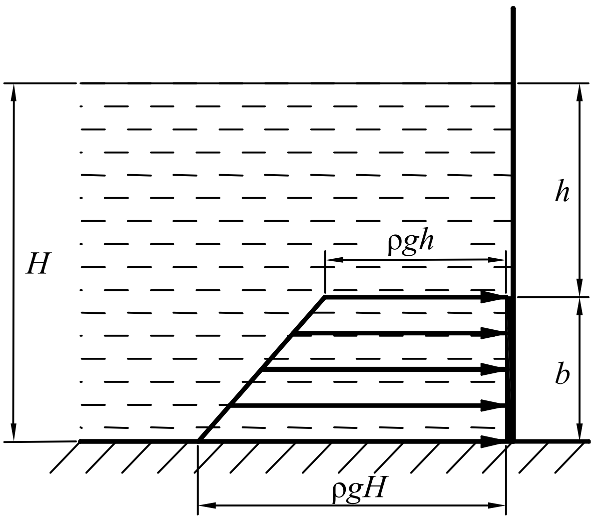


Рис. 3. Эпюра гидростатического давления

Графически сила г.с.д. на плоскую стенку может быть определена как объём эпюры г.с.д.

Эпюра гидростатического давления графически выражает закон распределения г.с.д. по глубине и строится на основании свойств г.с.д. (рис. 3) Стрелкой указывается направление действия г.с.д. на поверхность. Линейный размер стрелки соответствует числовому значению г.с.д. в данной точке поверхности в принятом масштабе.

Центром давления называется точка приложения силы P (точка Д). Местоположение этой точки определяется по формуле

$$h_{Д} = h_c + \frac{I_c}{h_c \omega}, \qquad (2.8)$$

где $h_{Д}$ – глубина погружения центра давления под свободную поверхность жидкости; I_c – момент инерции площади ω относительно оси, проходящей через её центр тяжести.

В табл. 7 приведены формулы момента инерции, площади поперечного сечения и координаты центра тяжести основных геометрических фигур. Графически центр давления находится как координата центра тяжести эпюры г.с.д.

Сила гидростатического давления на криволинейную поверхность определяется как геометрическая сумма проекций силы P (P_x, P_y, P_z) на соответствующие координатные оси *Ox, Oy, Oz:*

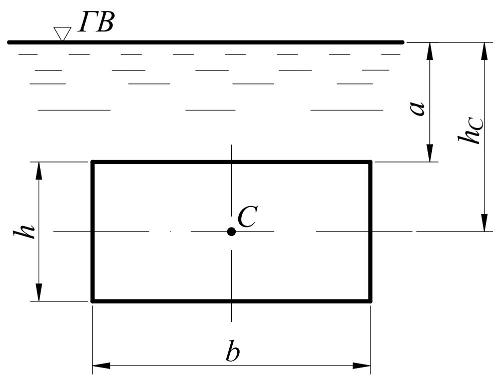
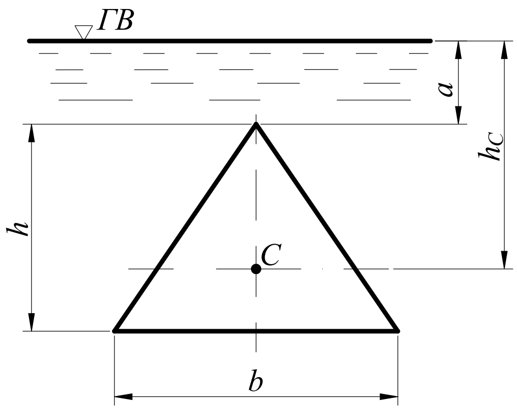
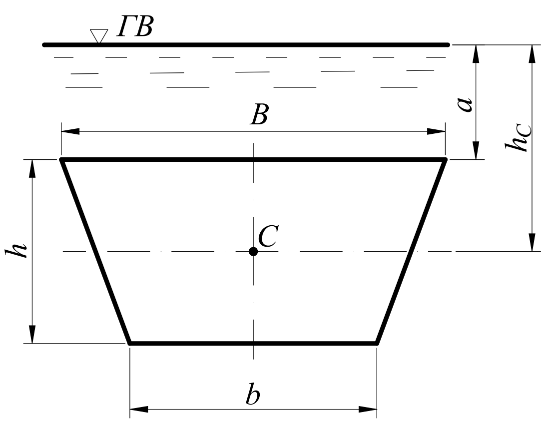
$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}\ . \qquad (2.9)$$

Если ось Oz направлена по вертикали, то проекции силы P по координатным осям будут равны:

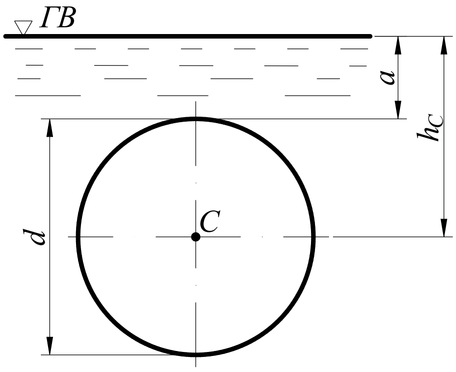
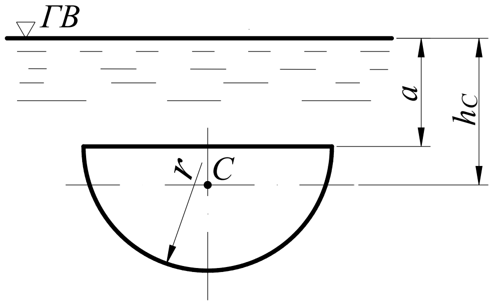
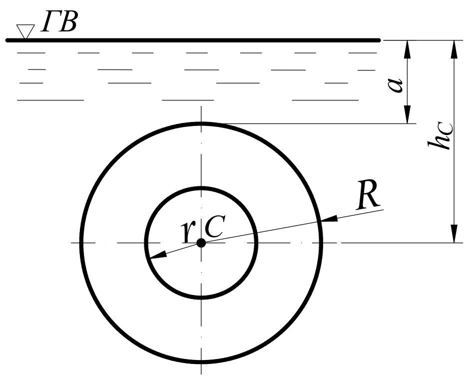
$$P_{x,y} = \rho g h_c \omega_z, \qquad (2.10)$$

Таблица 7

Моменты инерции I_c (относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести C), координаты центра тяжести h_C и площади ω плоских фигур

Вид фигуры, обозначения	I_C	h_C	ω
1	2	3	4
	$\frac{bh^3}{12}$	$a+\frac{h}{2}$	bh
	$\frac{bh^3}{36}$	$a+\frac{2}{3}h$	$\frac{bh}{2}$
	$\frac{h^3(B^2+4Bb+b^2)}{36(B+b)}$	$a+\frac{h(B+2b)}{3(B+b)}$	$\frac{(B+b)h}{2}$

Окончание табл. 7

1	2	3	4
	$\frac{\pi d^4}{64}$	$a+\frac{d}{2}$	$\frac{\pi d^2}{4}$
	$\frac{9\pi^2-64}{72\pi}r^4$	$a+\frac{4r}{3\pi}$	$\frac{\pi r^2}{2}$
	$\frac{\pi(R^4-r^4)}{4}$	$a+R$	$\pi(R^2-r^2)$

$$P_z = \rho g W_{ТД}, \qquad (2.11)$$

где ω_z – площадь проекции данной криволинейной поверхности на вертикальную плоскость, нормальную соответственно осям Ox и Oy; h_c – глубина погружения центра тяжести данной проекции под свободную поверхность жидкости; $W_{ТД}$ – объём тела давления.

В общем случае за тело давления принимается вертикальный столб, опирающийся на заданную криволинейную поверхность и ограниченный сверху плоскостью свободной поверхности жидкости.

На практике приходится иметь дело в основном с цилиндрическими поверхностями, образующая которых является прямой (цилиндрические и секторные щиты, круглые резервуары, трубы и т.п.). Поэтому одна из горизонтальных составляющих, например P_y, приравнивается к нулю.

Направление силы гидростатического давления на цилиндрическую поверхность *P* определяется углом φ, образуемым вектором *P* и горизонтальной плоскостью. Угол φ может быть определен через тригонометрическую функцию

$$\text{tg}\varphi = P_z / P_x. \qquad (2.12)$$

Давление жидкости на стенки круглой трубы *p* в гидравлических расчётах принимают одинаковым по всему её поперечному сечению вследствие малости её весового давления. Сила гидростатического давления на стенку определяется по формуле

$$P = dlp, \qquad (2.13)$$

где *d* – диаметр трубы; *l* – длина трубы.

Для круглой трубы справедливо следующее равенство:

$$pld = 2le\sigma, \qquad (2.14)$$

где σ – допускаемое напряжение на растяжение стенок; *e* – толщина стенки трубы (или резервуара цилиндрической формы). Тогда

$$e = pd / 2\sigma. \qquad (2.15)$$

Учитывая несовершенство отливки чугунных труб, ржавление стальных труб, расчётную толщину стенки трубы увеличивают на Δe, равное (3÷7) мм. Толщину стенок клёпаных труб увеличивают на 25%, с учётом ослабления стенки трубы заклёпками.

Закон Архимеда гласит: тело, погружённое в жидкость, испытывает со стороны жидкости силу давления, направленную снизу вверх и равную весу жидкости в объёме погруженной части тела. Эта сила давления называется *подъёмной* или *выталкивающей силой F*.

$$F = \rho g W_{погр}, \qquad (2.16)$$

где $W_{погр}$ – объём погруженной в жидкость части тела.

2.2. Примеры решения задач

Пример 1. Определить абсолютное давление на дне открытого котлована, наполненного водой до отметки 1,2 м. Результат дать в технических атмосферах (ат).

Решение. Абсолютное давление на дне определяется по формуле (2.2)

$p_A = p_0 + \rho g h$.

Принимаем: $p_0 = p_a = 1{,}0$ ат $= 9{,}81 \cdot 10^4$ Па (котлован открыт), $\rho = 1000$ кг/м^3

(плотность воды при неоговоренных условиях), h = 1,2 м (глубина воды в котловане). Тогда получим

$p_A = 9{,}81 \cdot 10^4 + 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}2 = 109\,872$ Па = 1,12 ат.

Пример 2. Нижняя часть рабочей камеры кессона находится на глубине h = 30,0 м от свободной поверхности воды. Определить избыточное давление воздуха p, которое необходимо создать в рабочей камере кессона, чтобы вода из реки не могла проникнуть в камеру.

Решение. Избыточное давление воздуха в рабочей камере должно быть не меньше гидростатического давления на этой глубине, т.е.

$p \geq \rho g h \geq 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 30{,}0 = 294\,300$ Па.

Пример 3. Найти давление на свободной поверхности воды p_0 в замкнутом резервуаре, если уровень жидкости в открытом пьезометре (рис.4) выше уровня жидкости в резервуаре на h = 2,0 м.

Решение. Из основного уравнения гидростатики, формула (2.2), следует, что давление в точках, находящихся на одном уровне, одинаково. Значит, абсолютное гидростатическое давление в точке A равно давлению на свободной поверхности воды в данном резервуаре. Тогда можно записать:

$p_0 = p_a + \rho g h = 9{,}81 \cdot 10^4 + 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}0 =$
$= 117\,720$ Па = 117,72 кПа ≈ 0,12 МПа.

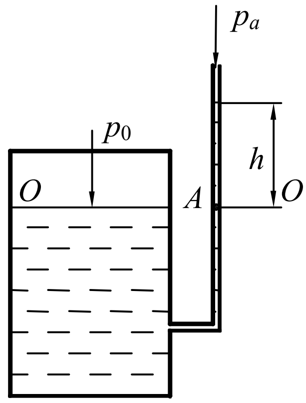


Рис. 4. К примеру 3

Пример 4. В U-образный сосуд налиты ртуть и вода (рис. 5). Линия раздела жидкостей $N - N$ расположена ниже свободной поверхности ртути на величину $h_{\text{ðò}}$ = 8 см. Определить разность уровней h в обеих частях сосуда.

Решение. Абсолютные давления в точках A и B равны, так как точки лежат в одной горизонтальной плоскости. Используя основное уравнение гидростатики (2.2), можно записать равенство

$$p_a + \rho_{\hat{a}} g h_{\hat{a}} = p_a + \rho_{\text{ðò}} g h_{\text{ðò}} .$$

Из уравнения следует:

$$h_{\hat{a}} = h_{\text{ðò}} \rho_{\text{ðò}} / \rho_{\hat{a}} .$$

Искомая разница уровней равна

$$h = h_в - h_{рт} = h_{рт}\rho_{рт} / \rho_в - h_{рт} =$$
$$= h_{рт}(\rho_{рт} / \rho_в - 1) = 8(13600/1000 - 1) = 100{,}8 \text{ см.}$$

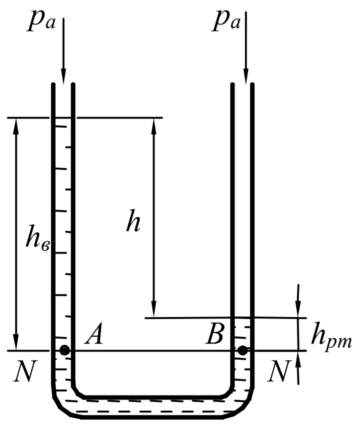


Рис. 5. К примеру 4

Пример 5. Канал с водой прямоугольного сечения шириной В = 3,5 м перегорожен подъёмным щитом (рис. 6), который помещается в параллелях (пазах) боковых сторон канала. Определить равнодействующую силу гидростатического давления на щит P и подъёмное усилие R, если коэффициент трения щита о параллели f = 0,35; вес щита G = 250 кгс; уровень воды слева от щита h_1 = 4,0 м; уровень воды справа от щита h_2 = 1,2 м.

Решение. По свойству гидростатического давления сила, действующая на поверхность произвольной формы, всегда направлена по внутренней нормали к ней. Отсюда следует, что равнодействующую силу давления на данный щит можно определить как алгебраическую сумму сил, действующих на щит слева (P_1) и справа (P_2):

$$P = P_1 - P_2 .$$

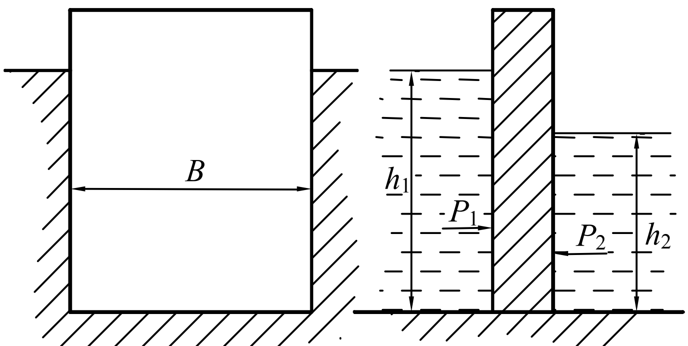


Рис. 6. К примеру 5

Так как на свободную поверхность воды в канале действует атмосферное давление, то имеет смысл рассматривать действие только избыточного давления на щит. Тогда из формулы (2.7) сила гидростатического давления может быть определена следующим образом:

$$P_1 = \rho g h_{C1} \omega_1 = \rho g (h_1 / 2) B h_1 = \rho g h_1^2 B / 2 = 1000 \cdot 9.81 \cdot 3{,}5 \cdot 4^2/2 = 274{,}68 \text{ кН};$$

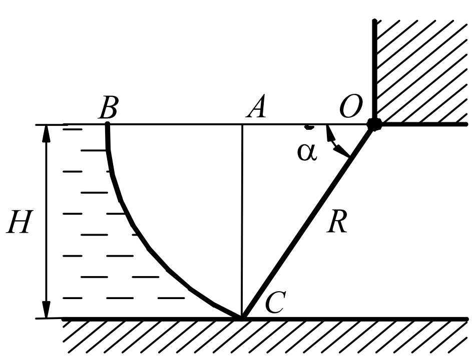


Рис. 7. К примеру 6

$$P_2 = \rho g h_{C2} \omega_2 = \rho g (h_2 / 2) B h_2 = \rho g h_2^2 B / 2 =$$
$$= 1000 \cdot 9.81 \cdot 3{,}5 \cdot 1{,}2^2/2 = 24{,}72 \text{кН};$$

$$P = 274{,}68 - 24{,}72 = 249{,}96 \text{ кН}.$$

Усилие, необходимое для подъёма щита,

$$R = G + f{\cdot}P = 250{\cdot}9{,}81 + 0{,}35{\cdot}249\,960 =$$
$$= 89\,938{,}5 \text{ Н} \approx 90 \text{ кН}.$$

Пример 6. Найти величину и направление силы гидростатического давления на 1,0 погонный метр ширины b секторного затвора (рис. 7) радиусом R = 2,5 м, если угол $\alpha = 60^\circ$.

Решение. Секторный затвор является частью цилиндрической поверхности, поэтому для определения силы P воспользуемся формулой (2.9), учитывая, что $P_y = 0$:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}\ .$$

Горизонтальная составляющая силы давления по формуле (2.10) равна

$$P_x = \rho g h \omega_z = \rho g (H/2) bH = \rho g H^2 b/2,$$

где H – напор перед секторным затвором.

Для определения напора рассмотрим прямоугольный треугольник OAC. В нём сторона $OA = R/2$ = 1,25 м, т.к. лежит против угла ACO, равного 30°.

Тогда катет $AC = H$ треугольника OAC определяется по теореме Пифагора:

$$H = \sqrt{R^2 - OA^2} = \sqrt{2{,}5^2 - 1{,}25^2} = 2{,}16 \text{ м.}$$

$P_x = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}16^2 \cdot 1{,}0/2 = 23{,}3$ кН.

Вертикальная составляющая силы давления по формуле (2.11) равна

$$P_z = \rho g W_{ТД} = \rho g \omega_{ABC} b,$$

где ω_{ABC} – площадь фигуры ABC.

Для определения площади фигуры ABC рассмотрим сектор OBC. Фигура ABC является частью сектора, поэтому её площадь можно найти как разность площадей сектора OBC и треугольника OAC.

$$\omega_{ABC} = \frac{\pi d^2}{4}\frac{\alpha}{360} - OA\frac{AC}{2} = \frac{\pi 4R^2}{4}\frac{\alpha}{360} - \frac{RH}{4} = 3{,}14 \cdot 2{,}5^2 \cdot 60/360 -$$

$- 2{,}5 \cdot 2{,}16/4 = 1{,}89$ м.

$P_z = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}89 \cdot 1{,}0 = 18{,}9$ кН.

Тогда величина силы гидростатического давления на затвор равна

$$P = \sqrt{23{,}3^2 + 18{,}9^2} = 29{,}7 \text{ кН.}$$

На основании свойства гидростатического давления можно утверждать, что сила P направлена по радиусу к секторному затвору, т.к. именно он является нормалью к окружности. Угол наклона φ силы P к горизонту определяется из тригонометрической функции по формуле (2.12)

$\mathrm{tg}\varphi = P_z / P_x = 18{,}9 / 23{,}3 = 0{,}81$.

$\varphi = 39{,}19^\circ$.

Пример 7. Бетонная плита весит в воздухе G = 1 230 Н, а в воде её вес меньше и составляет $G_в$ = 735 Н. Определить удельный вес этого бетона.

Решение. Согласно закону Архимеда тело, погружённое в жидкость, теряет в весе на величину выталкивающей силы F. Отсюда

$F = G - G_в$ = 1 230 – 735 = 495 Н.

Согласно тому же закону выталкивающая сила может быть определена как вес вытесненной бетонной плитой воды по формуле (2.16)

$F = \rho_в g W_б = \gamma_в W_б,$

где $\gamma_в$ – удельный вес воды; $W_б$ – объём бетонной плиты, который можно определить как отношение веса плиты на воздухе G к удельному весу бетона $\gamma_б$, т.е. $W_б = G / \gamma_б$. Тогда

$\gamma_б = \gamma_в G / F = 1000{\cdot}9{,}81{\cdot}1230 / 495 = 24376{,}36$ Н/м^3.

2.3. Задачи

2.3.1.Определить величину абсолютного давления на поверхности резервуара, если уровень жидкости в пьезометре превышает уровень свободной поверхности в резервуаре на 4,3 м. Плотность жидкости равна 930 кг/м^3.

Ответ: 137 340 Па.

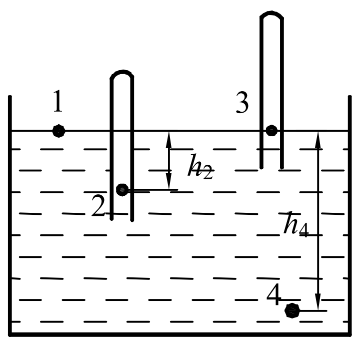


Рис. 8. К задаче 2.3.2

2.3.2. Определить абсолютное, избыточное, вакуумметрическое давление в точках 1, 2, 3, 4 заполненной водой ёмкости (рис. 8) и опущенных в неё закрытых сверху герметичных вертикальных трубках, если известно, что $h_1 = h_3 = 0$; $h_2 = 2{,}0$ м; $h_4 = 5{,}0$ м. Ускорение свободного падения принять равным 10 м/с^2.

Ответ: $p_{A_1} = p_{A_3} \approx 100$ кПа; $p_{A_2} = 120$ кПа; $p_{A_4} = 150$ кПа; $p_1 = p_3 = 0$.

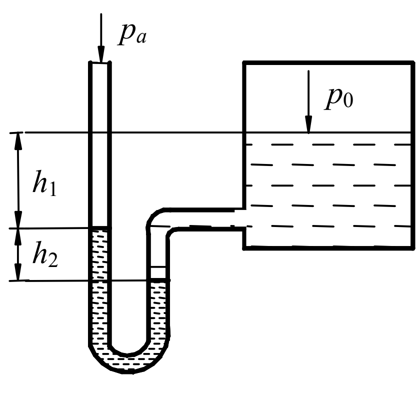


Рис. 9. К задаче 2.3.4

2.3.3. Как отличаются силы гидростатического давления и координаты погружения центров давления на квадратный и прямоугольный затворы с одинаковым погружением их центров тяжести и одинаковой площадью, если основание прямоугольного затвора меньше его высоты.

Ответ: $P_{êâ} = Đ_{ïð}$; $h_{Дкв} < h_{Дпр}$.

2.3.4. U-образный ртутный манометр подключён к резервуару, заполненному водой (рис. 9). Подсчитать:

а) давление на поверхности воды в резервуаре p_0, если $h_1 = 150$ мм, $h_2 = 250$ мм, $p_a = 100$ кПа;

б) высоту ртутного столба h_2, если $p_0 = p_a$ и $h_1 = 252$ мм.

Ответ: а) 127 490 Па; б) 20 мм.

2.3.5. Каково показание U-образного ртутного манометра (см. рис. 9), подключённого к резервуару с водой, если:
а) $h_1 + h_2 = 400$ мм; $p_0 = 107{,}87$ кПа; $p_a = 98\,070$ Па;
б) $h_1 + h_2 = 500$ мм; $p_0 = 122\,580$ Па; $p_a = 101\,000$ Па.

Ответ: а) 103 мм; б) 199 мм.

2.3.6. Сообщающиеся сосуды заполнены различными жидкостями (рис. 10). Удельный вес одной жидкости $\gamma_1 = 7\,350$ Н/м^3, удельный вес другой – $\gamma_2 = 12\,260$ Н/м^3, давление на свободной поверхности в сосудах $p_1 = p_2 = p_a$. Вычислить:

а) расстояние от линии раздела АВ до уровня жидкости в каждом сосуде h_1 и h_2 при разности уровней жидкостей в сосудах $h = 10$ см;

б) разность уровней h при $h_1 = 40$ см.

Ответ: а) 25 см и 15 см; б) 16 см.

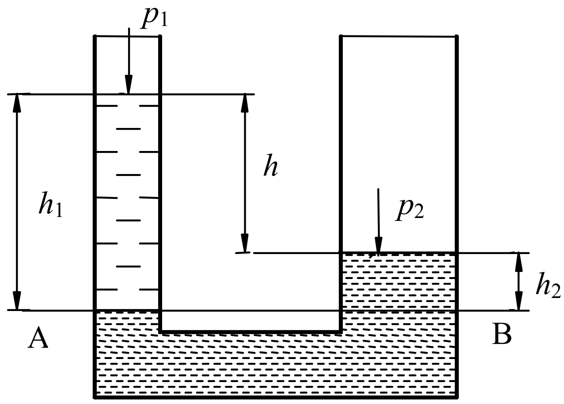


Рис. 10. К задаче 2.3.6.

2.3.7. Вычислить избыточное давление на забое скважины глубиной 1200 м, заполненной глинистым раствором удельного веса $\gamma = 1200$ кгс/м^3.

Ответ: 144 ат.

2.3.8. На сколько снизится давление на забое скважины глубиной 3200 м, если глинистый раствор плотностью $\rho = 1600$ кг/м^3 заменить водой?

Ответ: на 192 ат.

2.3.9. Вычислить избыточное гидростатическое давление на забое скважины, в которой имеется столб воды высотой 94 м, а поверх него столб нефти высотой 46 м. Плотность нефти принять равной 872 кг/м^3.

Ответ: 13,4 кПа.

2.3.10. Длинная трубка, имеющая внутренний диаметр 100 мм и открытая по концам, погружена в вертикальном положении в резервуар с водой (рис. 11).В верхний конец трубки залито 8 кг масла, плотность которого $\rho = 0{,}88$ г/см^3. На какой высоте h над уровнем воды в резервуаре установится уровень масла в трубке?

Ответ: 14 см.

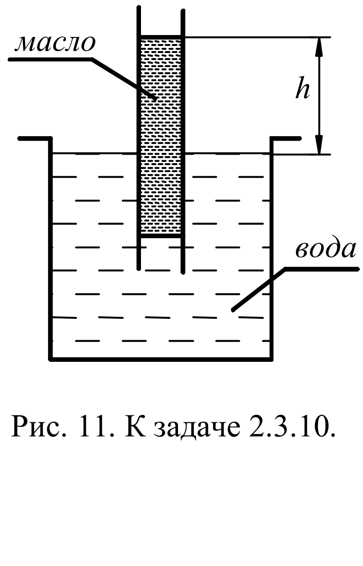


Рис. 11. К задаче 2.3.10.

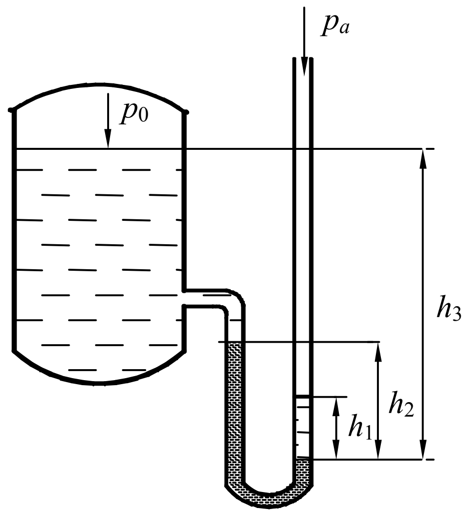


Рис. 12. К задаче 2.3.11

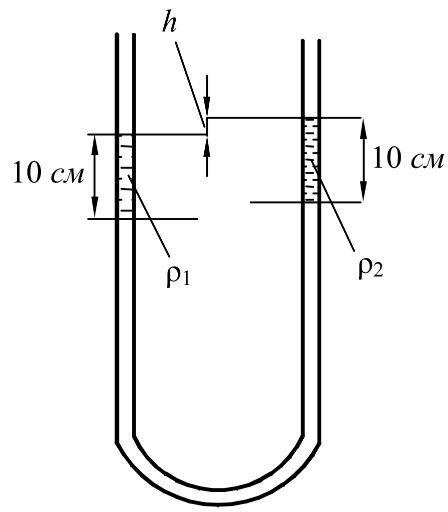


Рис. 13. К задаче 2.3.12

2.3.11. В закрытом сосуде (рис. 12) находится вода. Давление в сосуде p_0. В открытом конце манометрической трубки над ртутью имеется столб воды высотой h_1 = 15 см. Разность высот h_2 = 23 см, h_3 = 35 см. Вычислить абсолютное давление в сосуде.

Ответ: 61 120 Па.

2.3.12. В U-образную трубку налиты две равные по объёму жидкости: вода плотностью ρ_1 = 1000 кг/м^3 и керосин плотностью ρ_2 = 800 кг/м^3. Высота столба каждой жидкости составляет 10 см (рис. 13). Определить разность уровней h.

Ответ: 2 см.

2.3.13. Два сосуда A и B (рис. 14) одинакового диаметра D = 2,0 м заполнены водой. Сосуд A открыт. Сосуд B плотно закрыт крышкой, в небольшое отверстие которой вставлена тонкая трубка. Определить силу

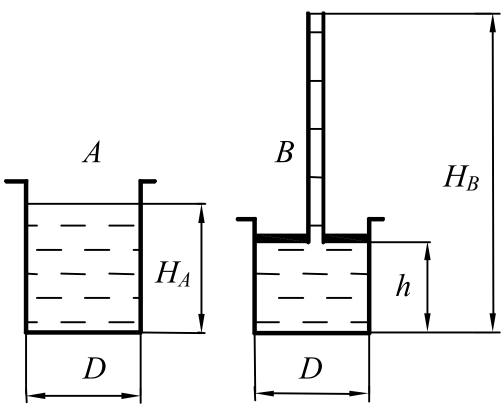


Рис. 14. К задаче 2.3.13

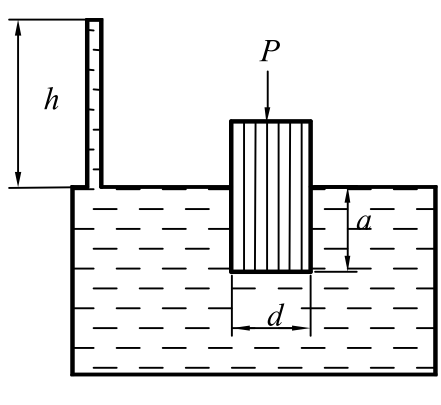


Рис. 15. К задаче 2.3.14

гидростатического давления на дно каждого сосуда, если:

а) H_A = 2,0 м; H_B = 10,0 м; h = 1,0 м;

б) H_A = 3,0 м; H_B = 3,0 м; h = 1,0 м.

Ответ: а) 61,6 кН; 308 кН; б) 92,38 кН.

2.3.14. Какую силу необходимо приложить к плунжеру, диаметр которого d = 200 мм, чтобы при его погружении в воду на глубину a = 300 мм уровень воды в пьезометрической трубке был равным h = 1,2 м (рис. 15)? Собственный вес плунжера не учитывать.

Ответ: 462 Н.

2.3.15. Определить силу давления воды на дно сосуда и на каждую из четырёх опор. Размеры сосуда указаны на чертеже (рис.16).

Ответ: 353,04 кН; 68,6 кН.

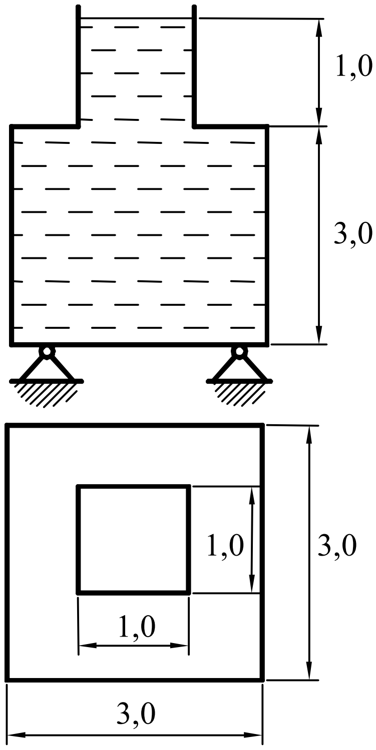


Рис. 16. К задаче 2.3.15

2.3.16. Найти силу давления воды на круглый щит, перекрывающий отверстие в вертикальной стенке (рис. 17) и точку приложения равнодействующей $h_Д$. Диаметр щита D =1,0 м, уровень воды над щитом h = 3,0 м.

Ответ: 27 000 Н; 3,52 м.

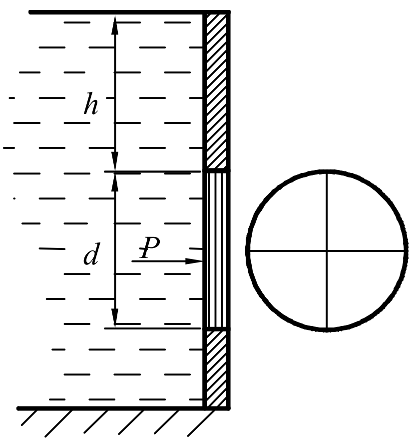


Рис. 17. К задаче 2.3.16

2.3.17. Найти величину силы, сдвигающей насыпь (рис. 18), если глубина воды H = 6,0 м, α = 60˚. Расчёт выполнить на 1,0 погонный метр длины насыпи b.

Ответ: 155,7 кН.

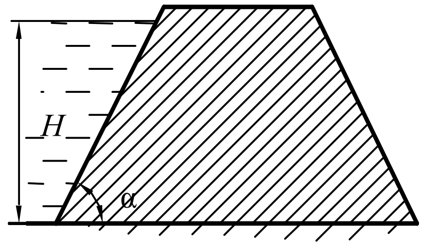


Рис. 18. К задаче 2.3.17

2.3.18. Какую силу P_2 нужно приложить к большему поршню, чтобы система находилась в равновесии, если P_1 = 150 Н, D = 300 мм, h = 80 см, d = 20 мм (рис. 19)?

Ответ: 31,9 кН.

2.3.19. Гидравлический домкрат (рис. 20) имеет диаметр большего поршня D = 250 мм, а диаметр меньшего поршня d = 25 мм; коэффициент полезного действия η = 0,8.

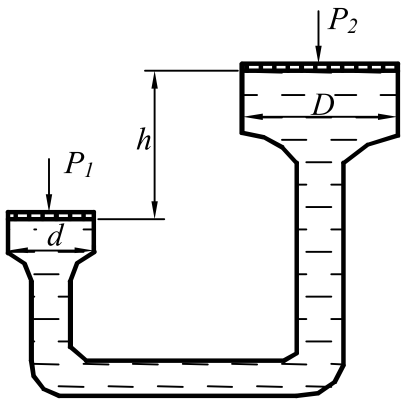


Рис. 19. К задаче 2.3.18

Плечи рычага a = 1,0 м и b = 0,2 м. Определить:

а) усилие F, которое необходимо приложить на конце рычага, чтобы поднять груз G =20 кН;

б) максимальную грузоподъёмность домкрата G из условия, что усилие F не будет превышать 10 кгс.

Ответ: а) 40,86 Н; б) 47 кН.

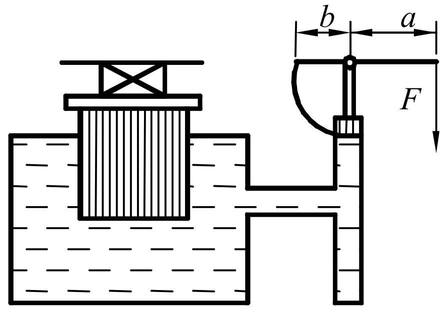


Рис. 20 К задаче 2.3.19

2.3.20. Для регулирования уровня воды в напорном баке установлен поворачивающийся щиток, который должен открывать квадратное отверстие с размером a = 0,4 м в вертикальной стенке (рис. 21) при напоре H = 2,0 м. Найти глубину погружения h шарнира O и силу давления на щиток.

Ответ: 2,21 м; 3 450 Н.

2.3.21. Чему равно полное давление в трубе в единицах СИ, если манометр показывает давление 2,0 кгс/см^2?

Ответ: ≈ 300 кПа.

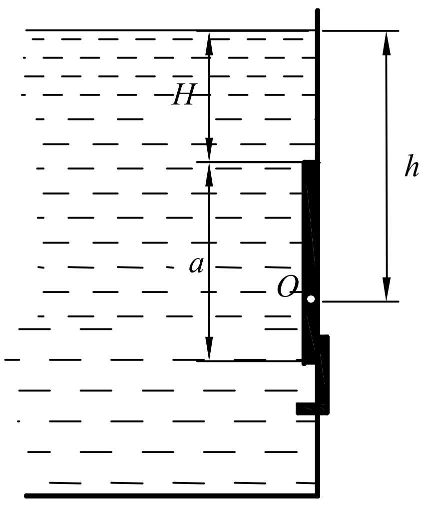


Рис. 21. К задаче 2.3.20

2.3.22. Манометр, установленный на водопроводной трубе, показывает давление 1,5 кгс/см^2. Какой пьезометрической высоте соответствует это давление?

Ответ: 15 м.

2.3.23. Вертикальный щит, составленный из шести досок длиной L = 2,0 м, одинаковой ширины, a = 25 см, сдерживает столб воды высотой H = 1,0 м (рис. 22). Вычислить силу гидростатического давления на щит и на каждую доску в отдельности.

Ответ: 22,05 кН; на верхнюю доску P_1 = 625 Н.

2.3.24. Сила давления воды через обшивку прямоугольного щита высотой

$H = 4{,}0$ м и шириной $B = 6{,}0$ м передаётся на четыре горизонтальные балки (рис. 23). На каких расстояниях x от свободной поверхности следует их расположить, чтобы они были нагружены одинаково?

Ответ: $x_1 = 1{,}33$ м; $x_2 = 2{,}44$ м; $x_3 = 3{,}16$ м; $x_4 = 3{,}74$ м.

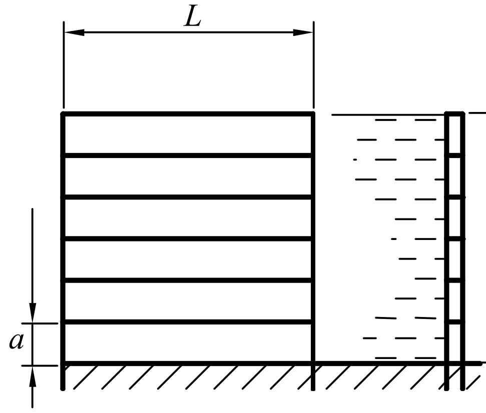


Рис. 22. К задаче 2.3.23

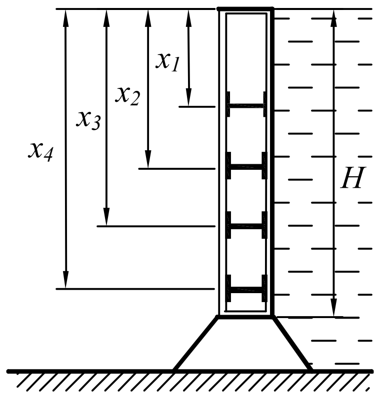


Рис. 23. К задаче 2.3.24

2.3.25. Плоская боковая стенка резервуара собрана из вертикальных досок шириной $a = 12$ см. Каждая из досок закреплена двумя болтами, расстояние между которыми $L = 110$ см (рис. 24). Расстояние от дна резервуара до нижнего болта $b = 5$ см. Резервуар заполнен водой до уровня $h = 75$ см. Вычислить усилия, растягивающие верхний и нижний болты.

Ответ: 92 Н; 245,5 Н.

2.3.26. Вычислить силу гидростатического давления на щит, перекрывающий треугольный водослив размерами: $h = 0{,}9$ м и $b = 0{,}8$ м (рис. 25).

Ответ: 108 кН.

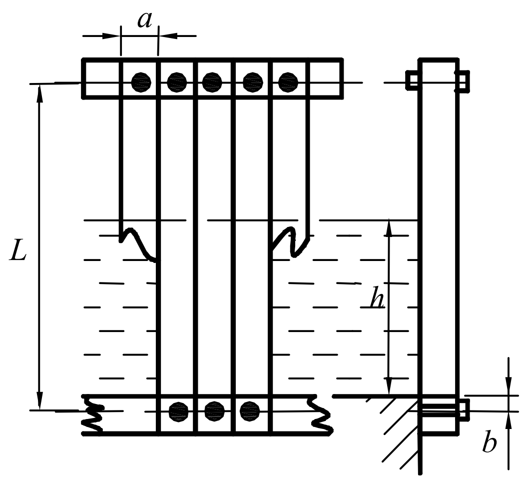


Рис. 24. К задаче 2.3.25

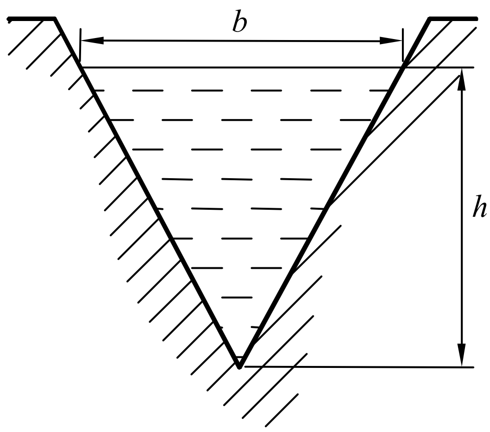


Рис. 25. К задаче 2.3.26

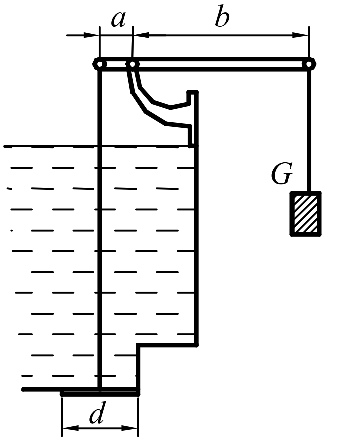


Рис. 26. К задаче 2.3.27

2.3.27. Открытый резервуар снабжён грузовым клапаном, предохраняющим резервуар от поднятия жидкости выше определённого уровня (рис. 26). Размеры клапана: d = 60 мм, a = 120 мм, b = 340 мм. Подобрать вес груза G с таким расчётом, чтобы клапан открывался при поднятии уровня жидкости в резервуаре до высоты H = 2,4 м. Удельный вес жидкости принять γ = 9,2 кН/м^3. Собственным весом клапана, тяги к нему и рычага пренебречь.

Ответ: 22,02 Н.

2.3.28. Определить натяжение троса, удерживающего прямоугольный щит шириной b = 2,0 м при глубине воды перед щитом H = 1,8 м (рис. 27), если угол наклона щита:

а) α = 60°; б) α = 45°.

Указание: весом щита пренебречь.

Ответ: а) 12,23 кН; б) 14,98 кН.

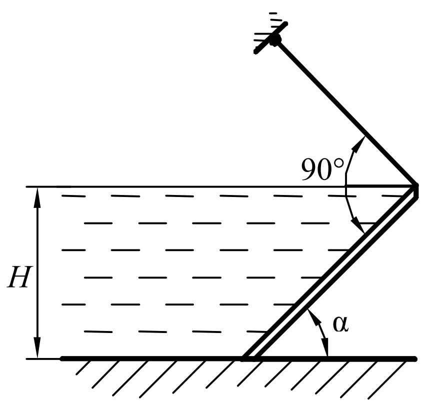


Рис. 27. К задаче 2.3.28

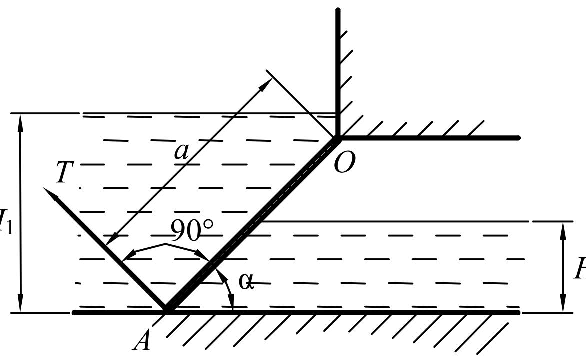


Рис. 28. К задаче 2.3.29

2.3.29. Прямоугольный щит длиной a = 5,0 м и шириной b = 5,0 м закреплён шарнирно в точке O (рис.28). Уровень воды слева H_1 = 4,0 м, справа H_2 = 2,0 м. Щит упирается в дно под углом α = 60°. Определить:

а) реакции опор A и O;

б) усилие T, необходимое для подъёма щита.

Ответ: а) 217,7 кН; 122,1 кН;

б) 217,7 кН.

2.3.30. Неподвижный сосуд, составленный из двух цилиндров, заполнен жидкостью, удерживаемой поршнями, на которые действуют соответствующие силы P_1 и P_2. Система находится в равновесии. Определить усилие P_2, если P_1 = 100 Н, плотность жидкости ρ = 1000 кг/м^3, x = 1,0 м, y = 0,8 м , d = 10 см, D = 40 см (рис. 29).

Ответ: 3,8 кН.

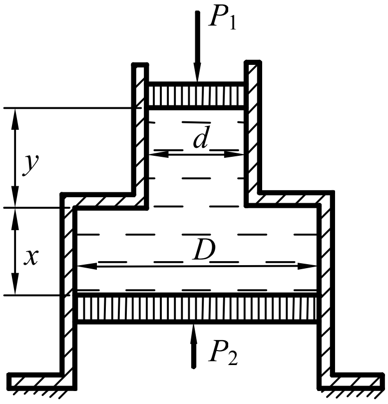


Рис. 29. К задаче 2.3.30

2.3.31. Квадратное отверстие размером B = 1,0 м в вертикальной стенке резервуара закрыто плоским поворотным щитом, который прижимается к стенке (рис. 30) под действием груза массой m, расположенном на плече a = 1,5 м. Определить:

а) минимальную массу груза m, достаточную для удержания воды в резервуаре на уровне H = 2,0 м, если расстояние от верхней кромки отверстия до оси вращения щита h = 0,3 м;

б) какой наименьший вакуум $p_{вак}$ над водой в резервуаре будет удерживать щит без груза?

Ответ: а) 857 кг; б) 15,7 кПа.

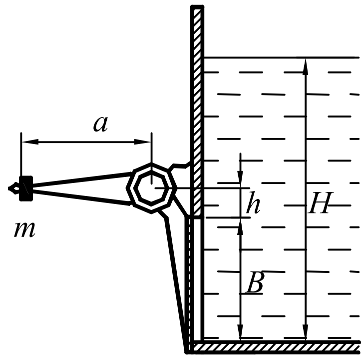


Рис. 30. К задаче 2.3.31

2.3.32. Покоящийся на неподвижном поршне и открытый сверху и снизу сосуд массой m = 16 кг состоит из двух цилиндрических частей, внутренние диаметры которых D = 0,5 м и d = 0,3 м (рис. 31). Определить, какой минимальный объём воды W должен содержаться в верхней части сосуда, чтобы сосуд всплыл над поршнем. Трением сосуда о поршень пренебречь.

Ответ: 9,0 л.

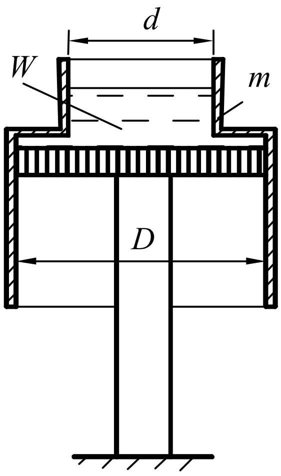


Рис. 31. К задаче 2.3.32

2.3.33. Цилиндрический сосуд диаметром D = 0,2 м и высотой a = 0,4 м заполнен водой и опирается на плунжер диаметром d = 0,1 м

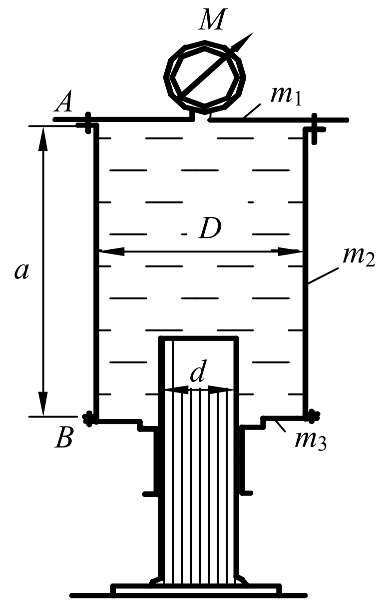


Рис. 32. К задаче 2.3.33

(рис. 32). Определить показания манометра M и нагрузки на болтовые группы A и B, если масса верхней крышки сосуда m_1 = 300 кг, масса цилиндрической части сосуда m_2 = 150 кг, масса нижней крышки сосуда m_3 = 120 кг.

Ответ: 724 кПа; 19,8 кН; 18,3 кН.

2.3.34. В резервуаре на слое воды мощностью 1,2 м находится 6,6 м нефти плотностью 900 кг/м^3. Диаметр резервуара равен 8 м. Определить давление на уровне дна резервуара и силу гидростатического давления, приложенную к его дну.

Ответ: 70 00 Па; 733 600 Н.

2.3.35. Прямоугольный поворотный затвор размерами $a \times b = 1 \times 2$ (м) перекрывает выход из резервуара (рис. 33). На каком расстоянии x необходимо расположить ось затвора O, чтобы при открывании его в начальный момент необходимо было преодолевать только силы трения в шарнирах при глубине в резервуаре: а) H = 3,0 м; б) H = 4,0 м.

Ответ: а) 46,7 см; б) 47,6 см.

2.3.36. Как должны относиться диаметры поршня D/d, если поршень находится в равновесии при соотношении уровней $z_2 = 5z_1$ (рис. 34)?

Ответ: $\sqrt{6}$.

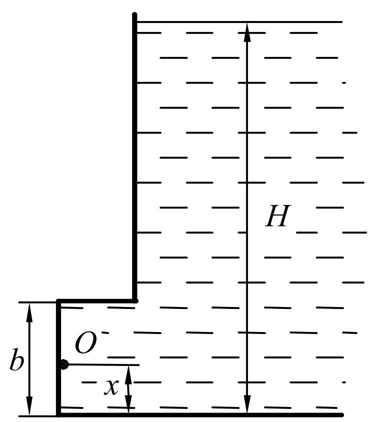


Рис. 33. К задаче 2.3.35

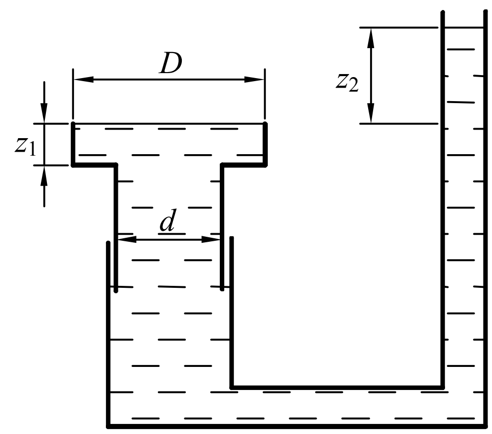


Рис. 34. К задаче 2.3.36

2.3.37. На какой высоте над манометром, присоединённым к резервуару, находится уровень нефти плотностью 840 кг/м^3, если манометр показывает давление $1{,}21 \cdot 10^5$ Па?

Ответ: 14,7 м.

2.3.38. Определить реакцию крюка R_k, удерживающего прямоугольный щит шириной b = 1,0 м, при следующих данных: H_1 = 4,2 м, H_2 = 2,1 м, h = 0,5 м (рис. 35).

Ответ: 23 кН.

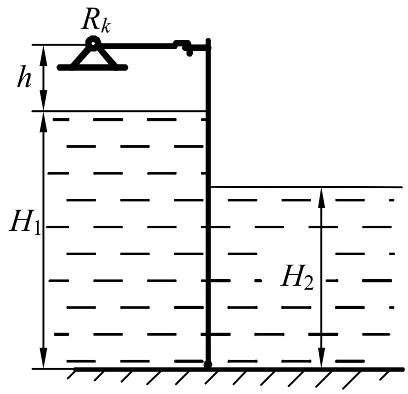


Рис. 35. К задаче 2.3.38

2.3.39. Какое избыточное давление испытывает водолаз, опустившийся на глубину 27 м?

Ответ: 2,7 ат.

2.3.40. Вычислить абсолютное давление в газопроводе, если заполненный водой манометр показывает вакуум 382 мм вод. ст., а барометрическое давление равно 752 мм рт. ст.

Ответ: 0,985 кгс/см^2.

2.3.41. Прямоугольный щит шириной B = 2,0 м закреплён шарнирно в точке O (рис. 36). Определить усилие T, необходимое для подъёма щита при H_1 = 2,4 м, H_2 = 1,5 м, h =1,0 м, α = 45°.

Ответ: 40,46 кН.

2.3.42. Определить величину и направление силы гидростатического давления на 1,0 м ширины затвора, представляющего собой четверть кругового цилиндра (рис. 37) радиусом R =1,5 м.

Ответ: 12 кН; 23°42′.

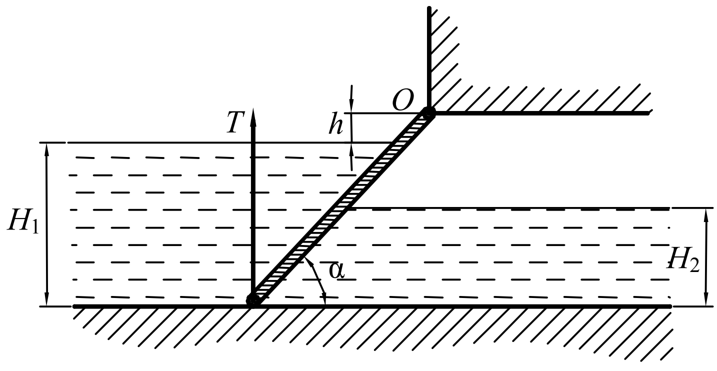


Рис. 36. К задаче 2.3.41

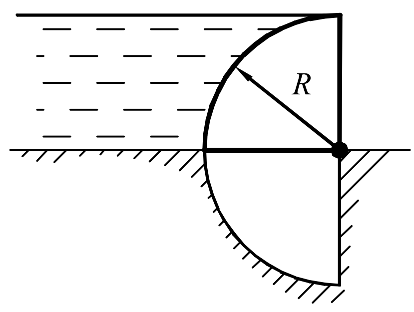


Рис. 37. К задаче 2.3.42

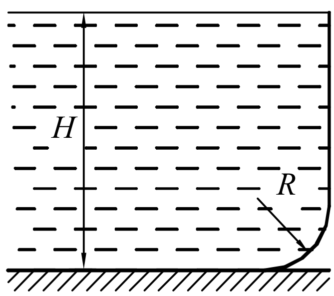


Рис. 38. К задаче 2.3.43

2.3.43. Найти величину и направление силы давления воды на 1,0 м ширины затвора (рис. 38), если R = 1,0 м, H = 2,0 м.

Ответ: 26,3 кН; 41°42′.

2.3.44. Внизу вертикальной стенки резервуар с водой имеет фасонную часть в виде четверти поверхности цилиндра (рис. 39). Определить величину и направление силы давления воды на 1,0 погонный метр ширины фасонной части, если R = 1,2 м, H = 3,0 м.

Ответ: 379 кН; tgφ = 0,85.

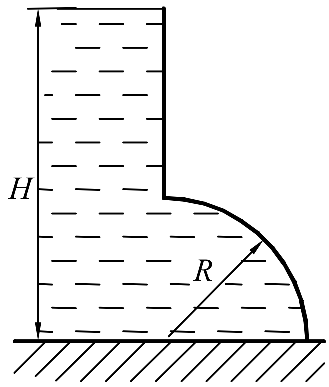


Рис. 39. К задаче 2.3.44

2.3.45. Тело, погружённое в воду, потеряло 1/8 своего веса. Определить плотность тела.

Ответ: 8 000 кг/м^3.

2.3.46. Вес поплавка в воздухе 721 Н. Вес поплавка, погружённого в воду, 561,7 Н. Какова плотность исследуемой жидкости, если погруженный в неё поплавок весит 537,9 Н?

Ответ: 1149 кг/м^3.

2.3.47. Показания манометра, присоединённого к днищу бака, 10 кПа (рис. 40). Найти:

а) давление воздуха $p_в$, находящегося над водой, если h_1 = 1,8 м, h_2 = 1,0 м;

б) растягивающее усилие болтов P, крепящих в вертикальной стенке бака коническую крышку диаметром d = 0,8 м. Массой крышки пренебречь.

Ответ: а) –17,5 кПа (разрежение); б) –3,82 кН (крышка прижимается к баку).

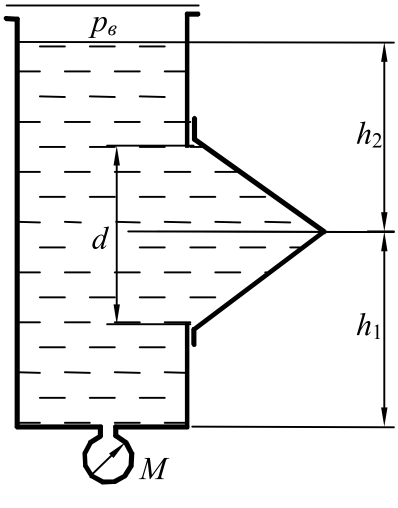


Рис. 40. К задаче 2.3.47

2.3.48. Определить площадь плоской льдины толщиной h = 0,4 м, способной удержать груз G = 21,1 кН. Плотность льдины 920 кг/м^3.

Ответ: 66 м^2.

2.3.49. Монолитная плита весит в воздухе 2000 Н, а в воде 800 Н. Определить удельный вес монолита.

Ответ: 16 666 Н/м^3.

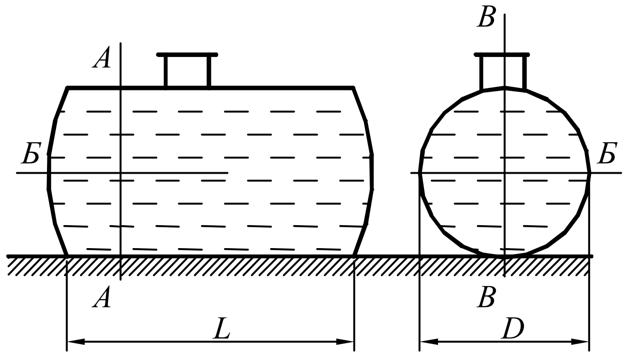


Рис. 41. К задаче 2.3.50

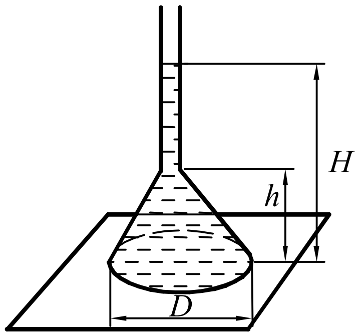


Рис. 42. К задаче 2.3.51

2.3.50. Лежащий на земле цилиндрический резервуар (рис. 41) диаметром D = 200 см и длиной L = 600 см заполнен керосином с удельным весом γ = 8 200 Н/м^3. Горловина резервуара открыта. Вычислить усилия, разрывающие резервуар по сечениям *А–А*, *Б–Б*, *В–В*.

Ответ: 25,75 кН; 21,16 кН; 98,40 кН.

2.3.51. Перевёрнутая тяжёлая воронка размерами D = 20 см, h = 10 см, H = 20 см поставлена на ровную горизонтальную поверхность, покрытую листовой резиной. Узкое отверстие воронки заканчивается тонкой трубкой, через которую можно наливать внутрь воронки воду (рис. 42). При какой массе m вода начинает вытекать из-под воронки?

Ответ: 5,2 кг.

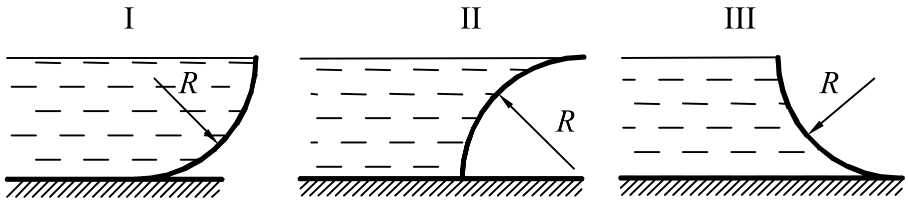


Рис. 43. К задаче 2.3.52

2.3.52. Определить величину и направление силы давления воды на 1,0 погонный метр ширины затвора, представляющего собой четверть кругового цилиндра (рис. 43) радиусом R = 3,0 м.

Ответ: 82,9 кН; 48,8 кН; 82,9 кН.

2.3.53. Определить потребное число пустых бочек для устройства плота и переправы на нём через реку машины с грузом G = 21 кН, если диаметр бочки D = 0,7 м, длина бочки l = 1,2 м, вес одной бочки q = 500 Н.

Ответ: 5 шт.

2.3.54. Рассчитать плот из бочек, скреплённых 10 брёвнами диаметром d = 240 мм и 20 досками сечением 200×50 мм для переправы груза массой 2000 кг, если плотность древесины 800 кг/м^3, длина плота L = 6,0 м, вес одной бочки q = 300 Н и объём одной бочки W= 200 л.

Ответ: 10 шт.

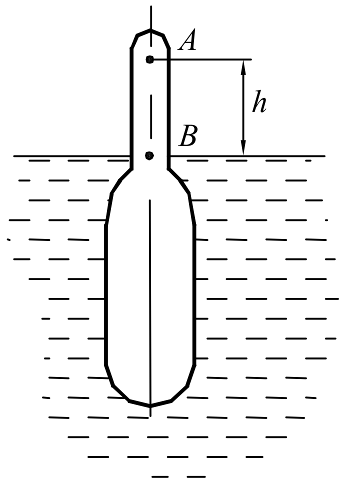


Рис. 44. К задаче 2.3.55

2.3.55. Ареометр весом 0,52 Н погружён в нефть плотностью 870 кг/м^3 до отметки A и в воде до отметки B (рис. 44). Определить расстояние h между отметками A и B, если диаметр шейки ареометра равен 10 мм.

Ответ: 105 мм.

2.3.56. Бетонная плита весит в воздухе 1230 Н, а в воде 735 Н. Определить удельный вес бетона.

Ответ: 24 500 Н/м^3.

2.3.57. С целью определения удельного веса неизвестного сплава слиток его взвесили дважды: один раз в воздухе, другой раз – погрузив в воду. Вес слитка в воздухе 0,164 кгс. Вес слитка в воде 0,150 кгс. Вычислить удельный вес сплава.

Ответ: 11 300 Н/м^3.

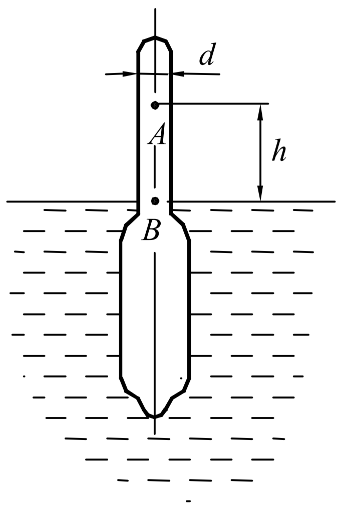


Рис. 45. К задаче 2.3.58

2.3.58. Сколько брёвен диаметром d = 300 мм и длиной l = 10,0 м необходимо для сооружения плота, способного удержать груз весом G = 2,6 кН? Плотность древесины 840 кг/м^3.

Ответ: 4 шт.

2.3.59. Ареометр (рис. 45) весом 0,56 Н в рассоле с удельным весом γ_1 = 11600 Н/м^3 погружён до отметки B, а в рассоле с удельным весом γ_2 = 11900 Н/м^3 – до отметки A. Вычислить расстояние h между отметками A и B, если диаметр шейки ареометра равен 6 мм.

Ответ: 4,3 см.

2.3.60. Нефтеналивное судно прямоугольного сечения с плоским дном длиной 100,0 м и шириной 20,0 м с полным грузом имеет осадку 2,5 м, а без груза – 400 мм. Определить массу нефти, перевозимой судном. Плотность морской воды принять равной 1000 кг/м^3.

Ответ: 42 т.

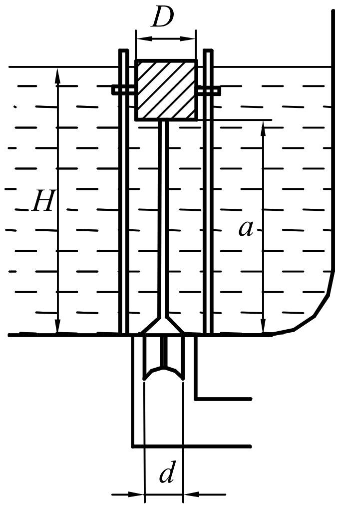


Рис. 46. К задаче 2.3.60

2.3.61. Уровень жидкости в резервуаре регулируется клапаном, связанным с поплавком, имеющим форму цилиндра с вертикальной осью (рис. 46). Размеры поплавка и клапана следующие: D = 200 мм, d = 30 мм , a = 1500 мм. Масса поплавка с клапаном равна 2,06 кг. В резервуар поступает нефть плотностью 880 кг/м^3. Определить, при какой высоте уровня жидкости H откроется клапан. Толщиной тяги, соединяющей поплавок с клапаном, пренебречь.

Ответ: 1,62 м.

2.3.62. В бурящейся скважине находится бурильный инструмент, масса которого 88 т. Плотность глинистого раствора 1180 кг/м^3. Определить нагрузку, испытываемую крюком, если $\rho_{ст}$ = 7850 кг/м^3.

Ответ: 733 600 Н.

2.3.63. Плоскодонная металлическая баржа длиной 36 м и шириной 10 м с грузом песка имела осадку 1 м. После выгрузки песка осадка баржи стала равной 25 см. Определить массу выгруженного песка, если объёмный вес его равен $2 \cdot 10^3$ дин/см^3.

Ответ: $56{,}5 \cdot 10^4$ кг.

2.3.64. Подводный железобетонный тоннель круглого сечения с внутренним диаметром D = 3,0 м и толщиной стенки δ = 250 мм удерживается от всплытия тросами T, расположенными попарно через каждые 6,0 м длины тоннеля (рис. 47). Определить натяжение тросов, принимая, что дополнительная нагрузка, приходящаяся на 1,0 м длины тоннеля, равна G = 10 кН, а плотность бетона равна 2,5 т/м^3.

Ответ: 75,5 кН.

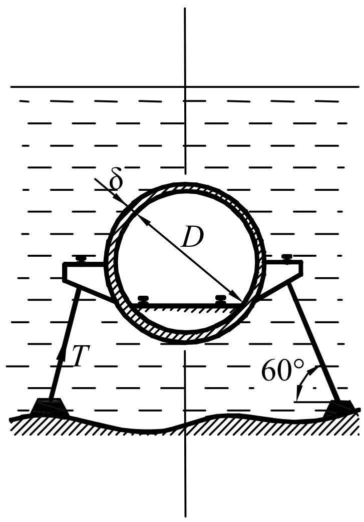


Рис. 47. К задаче 2.3.63

3.6.65. Вычислить вес 800 погонных метров стальных насосных штанг диаметром 3/4″, опущенных в скважину, заполненную нефтью с удельным весом 900 кгс/м^3, если известно, что 1 погонный метр таких штанг с муфтами весит на воздухе 2,4 кгс. Плотность стали принять равной 7 800 кг/м^3.

Ответ: 1 700 кгс.

2.4. Примеры решения задач на случаи относительного равновесия

Случай 1. Жидкость перемещается равноускоренно с горизонтальным ускорением, например в движущейся цистерне (рис.48). Свободная поверхность жидкости будет наклонена к горизонту под углом α, который можно определить через тригонометрическую функцию

$$\alpha = \mathrm{arctg}\,(-j / g), \qquad (2.17)$$

где $-j$ – горизонтальное ускорение.

Пример к случаю 1. При торможении вагона-цистерны, частично заполненной нефтью, возникло ускорение a = -2 м/с^2. Определить угол наклона свободной поверхности нефти к горизонту.

Решение. При торможении вся масса нефти будет стремиться продолжить по инерции своё движение с ускорением $j = -a$.

Угол наклона поверхности нефти к горизонту определяем по формуле (2.17)

$\alpha = \mathrm{arctg}\,(2 / 9{,}81) \approx 11^{\circ}20'$.

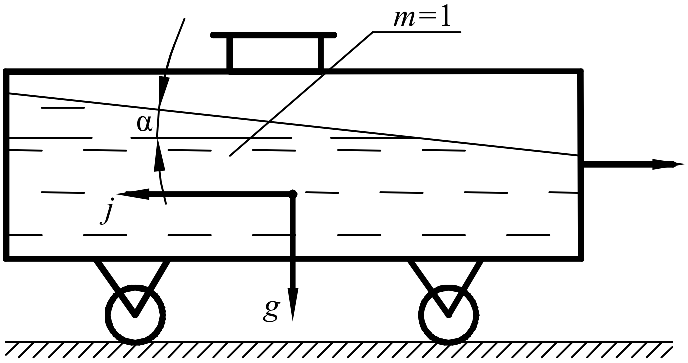


Рис. 48. К случаю 1

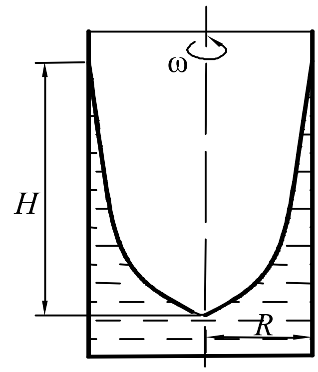


Рис. 49. К случаю 2

Случай 2. Открытый цилиндрический сосуд (рис. 49), наполненный жидкостью, вращается вокруг своей вертикальной оси с постоянной угловой скоростью ω. Жидкость в этом случае будет вращаться с той же угловой скоростью и, следовательно, по отношению к стенкам сосуда будет в состоянии покоя.

Уравнение параболоида вращения, сечение которого вертикальными плоскостями даёт параболу, а горизонтальными – окружность, можно записать в следующем виде:

$$H = \omega^2 R^2 / 2g, \qquad (2.18)$$

где H – высота параболоида; R – радиус цилиндрического сосуда; ω – угловая скорость, связанная с числом оборотов вращающегося тела в минуту формулой

$$\omega = \pi n / 30, \qquad (2.19)$$

где n – число оборотов в минуту.

Тогда из формул (2.18) и (2.19) имеем

$$n = 30\sqrt{2gH} / \pi R. \qquad (2.20)$$

Пример к случаю 2. В цилиндрическую форму (рис.50) высотой L = 1000 мм и внутренним диаметром D = 1120 мм, вращающуюся при n = 500 об/мин, залит цементный раствор (литой) с удельным весом γ = 1 600 кгс/м^3 для изготовления трубы центробежным способом. При толщине стенки цементной трубы δ_1 = 60 мм определить толщину стенки трубы δ_2 у верхней торцовой стенки формы.

Решение. Толщину стенки трубы вверху δ_2 можно определить, зная радиус параболоида вращения r_2. Для этого воспользуемся формулой (2.18)

$h_2 = \omega^2 r_2^2/2g,$

из которой

$r_2 = \sqrt{2gh_2} / \omega.$

Высоту параболоида h_2 можно определить как сумму:

$h_2 = h_1 + L = \omega^2 r_1^2/2g + L.$

Для определения угловой скорости воспользуемся формулой (2.19)

$\omega = \pi n/30 = 3{,}14 \cdot 500 / 30 = 52{,}4$ с$^{-1}$.

Радиус параболоида вращения при h_1 равен

$r_1 = D/2 - \delta_1 = 1120 / 2 - 60 = 500$ мм = 0,5 м.

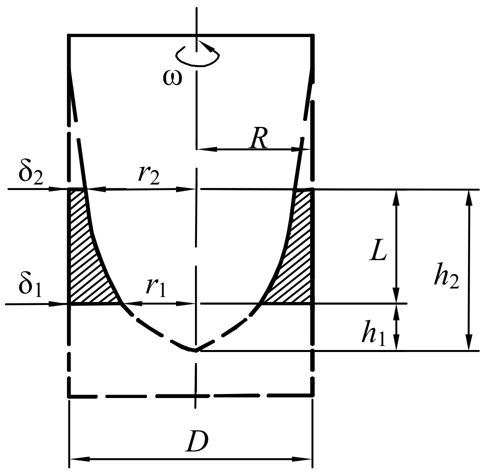


Рис. 50. К случаю 2

Тогда при L = 1000 мм = 1,0 м

$h_2 = 52.4^2 \cdot 0.5^2 / (2 \cdot 9.81) + 1.0 = 35{,}9$ м.

$r_2 = \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 35{,}9} / 52{,}4 = 0.507$ м = 507 мм.

Толщина стенки цементной трубы у верхней торцовой части формы будет определяться как разность радиусов цилиндрической формы ($R = D/2$) и параболоида вращения на высоте h_2:

$\delta_2 = D/2 - r_2 = 1120 / 2 - 507 = 53$ мм.

Таким образом, толщина стенки трубы в верхней её части меньше, чем в нижней, на 7 мм. В случае уменьшения разности между δ_1 и δ_2 необходимо повысить угловую скорость вращения формы, т.е. число оборотов в минуту *n*.

Случай 3. Жидкость движется с постоянной скоростью на излучине реки (рис. 51) под действием центробежной силы и силы тяжести. Полагая, что во всех точках излучины скорость движения частиц жидкости равна *V* – постоянной величине для данного участка реки, можно определить возвышение свободной поверхности у дальнего берега излучины:

$$h_{возв} = 2.3\, V^2 lg(R/r)/g, \qquad (2.21)$$

где $h_{возв}$ – разность отметок свободной поверхности у противоположных берегов излучины; *R* – радиус кривизны вогнутого берега излучины; *r* – радиус кривизны выпуклого берега излучины.

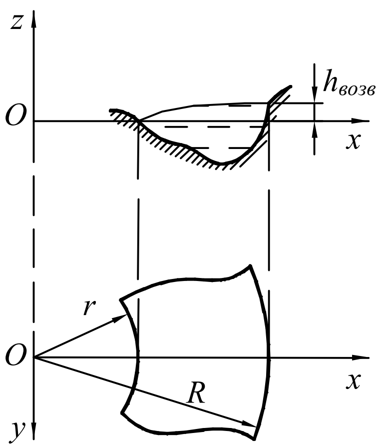


Рис. 51. К случаю 3

Пример к случаю 3 . В открытом канале шириной *B* = 20 м поток воды движется со средней скоростью *V* = 3 м/с.

Определить разность отметок горизонтов воды у противоположных берегов на повороте канала, если радиус кривизны оси канала R_0 = 70 м.

Решение. Определяем радиусы кривизны выпуклого *r* и вогнутого *R* берегов канала:

$r = R_0 - B/2 = 70 - 20 / 2 = 60$ м;

$R = R_0 + B/2 = 70 + 20 / 2 = 80$ м.

У вогнутого берега поверхность воды будет выше, чем у выпуклого берега, на величину, определяемую по формуле (2.21):

$h_{возв} = 2{,}3 \cdot 3^2 \cdot lg(80 / 60) / 9{,}81 = 0{,}26$ м.

3. ГИДРОДИНАМИКА

3.1. Основные понятия

3.1.1. Основы гидродинамики

Установившееся движение – это движение, при котором в данной точке пространства давление и скорость (параметры движения) не изменяются во времени. Установившееся движение наблюдается при истечении жидкости из резервуара, в котором поддерживается постоянный уровень свободной поверхности, т.е. постоянный напор. Установившееся движение жидкости наблюдается редко. Однако весьма часто при решении практических задач можно к неустановившемуся движению для отдельных периодов времени применять уравнения установившегося движения.

Равномерное движение – движение жидкости с постоянной скоростью по длине потока (например, движение жидкости в трубе постоянного диаметра). Равномерное движение в трубах может быть как установившимся, так и неустановившимся, а в открытых руслах (в реальных условиях) равномерное движение может быть только установившимся.

Сплошным (непрерывным) движением называется такое, при котором жидкость занимает всё пространство своего движения без образования внутри потока пустот (разрывов).

Линия тока – это кривая, в каждой точке которой вектор скорости направлен по касательной к ней.

Трубка тока образуется, если по периметру бесконечно малой площадки провести линии тока.

Элементарная струйка образуется, если трубку тока заполнить линиями тока. По своим свойствам элементарная струйка считается непроницаемой для соседних частиц жидкости, форма её остаётся неизменной по длине, и вследствие её малости скорость считается постоянной по сечению.

Местная скорость u – скорость элементарной струйки.

Поток жидкости – совокупность элементарных струек.

Живое сечение – поперечное сечение потока, проведённое перпендикулярно к векторам скоростей элементарных струек. В гидравлических расчётах при решении большинства инженерных задач принято считать поток параллельно-струйчатым и плавноизменяющимся. В связи с этим за живое сечение в напорных трубопроводах и самотечных трубах, заполненных жидкостью по всему сечению, условно принимается плоское сечение, проведённое перпендикулярно оси потока жидкости. В открытых руслах вследствие малости уклонов живое сечение условно принимается вертикальным.

Смоченный периметр – периметр живого сечения потока, касающийся твёрдых стенок, ограничивающих поток.

Напорный поток – поток, со всех сторон ограниченный твёрдыми стенками (например, поток, движущийся в водопроводной трубе).

Безнапорный поток – поток, верхняя часть боковой поверхности которого является свободной, а остальная – смоченной (например, речной поток).

Гидравлический радиус R показывает, сколько площади трения приходится на единицу длины смоченного периметра, и определяется по формуле

$$R = \omega / \chi, \tag{3.1}$$

где ω – площадь живого сечения; χ – смоченный периметр.

Для круглых труб гидравлический радиус $R = d / 4$.

Расход – количество жидкости, проходящее через живое сечение в единицу времени. Практически всегда в гидравлических расчётах используется *объёмный расход Q*:

$$Q = W / t, \tag{3.2}$$

где W – объёмное количество жидкости; t – время истечения данного объёма.

В тех случаях, когда необходимо определить *массовый расход* Q_m, пользуются формулой

$$Q_m = m / t, \tag{3.3}$$

где m – масса проходящей через живое сечение жидкости за время t.

Средняя скорость V – условная для данного живого сечения средняя скорость течения:

$$V = Q / \omega. \tag{3.4}$$

Величина *расхода Q* для данного живого сечения выражается согласно формуле (3.4):

$$Q = \omega V. \tag{3.5}$$

Режим движения жидкости – ламинарный и турбулентный – определяется безразмерным критерием Рейнольдса Re:

$$Re = VL / \nu, \tag{3.6}$$

где Re – число Рейнольдса; L – характерный параметр потока (для круглых труб $L = d$, где d – диаметр трубы; для потоков произвольного поперечного сечения $L = R$, т.е. гидравлическому радиусу); ν – кинематическая вязкость жидкости.

Критическим числом $Re_к$ считается такое число Рейнольдса, при котором происходит смена режима движения жидкости:

если $Re < Re_к$ – режим движения жидкости ламинарный,

если $Re > Re_к$ – режим движения жидкости турбулентный.

Так, для круглых труб $Re_к = 2320$, а для потоков произвольного поперечного сечения, в частности для открытых русел, $Re_к = 560$. Приведённые значения критических чисел Рейнольдса относятся к равномерному движению. При ускоренном движении $Re_к$ возрастает, а при замедленном уменьшается. Кроме того, считается, что установившийся турбулентный режим возможен при числах Рейнольдса $Re > 4000$.

Уравнение неразрывности потока (уравнение баланса расхода) справедливо для установившегося движения, отражает свойства несжимаемости жидкости и сплошности её движения и записывается в следующем виде:

$$\omega_1 V_1 = \omega_2 V_2 = \text{const}, \tag{3.7}$$

где ω_1 и ω_2 – площади соответствующих живых сечений; V_1 и V_2 – средние скорости в соответствующих сечениях.

Из этого уравнения следует:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} , \tag{3.8}$$

т.е. средние скорости обратно пропорциональны соответствующим площадям живых сечений.

Уравнение Бернулли (УБ) *для потока реальной жидкости* (***уравнение баланса энергии)*** справедливо для установившегося движения, выражает закон сохранения энергии потока движущейся жидкости и записывается в удельной форме (относительно единицы веса жидкости) для двух сечений и горизонтальной плоскости сравнения в следующем виде:

$$\frac{\alpha V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + h_W , \tag{3.9}$$

где $\frac{\alpha V_1^2}{2g}$, $\frac{\alpha V_2^2}{2g}$ – удельная кинетическая энергия соответственно в первом и втором сечениях (скоростной напор); $\frac{p_1}{\rho g}$, $\frac{p_2}{\rho g}$ – удельная потенциальная энергия давления соответственно в первом и втором сечениях (пьезометрическая высота); z_1, z_2 – удельная потенциальная энергия положения соответственно в первом и втором сечениях (геометрическая высота, т.е. расстояние по высоте от плоскости сравнения до центра тяжести сечения); h_W – потери энергии при движении потока жидкости от первого сечения до второго (потери напора); α– коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скорости по живому сечению (для дорожно-мостового строительства α = 1,1); V_1, V_2 – средние скорости в соответствующих живых сечениях; p_1, p_2 – избыточное давление в центре тяжести соответствующих сечений; ρ – плотность жидкости.

Сумма первых трёх слагаемых в левой и правой частях уравнения Бернулли (3.9) в энергетическом смысле выражает ***полную удельную энергию*** потока E_1 и E_2 в соответствующих сечениях:

$$E = \frac{\alpha V^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z . \tag{3.10}$$

В геометрическом смысле эта сумма называется ***гидродинамическим напором*** H_{01} и H_{02} или *полным напором* в первом и втором сечениях потока жидкости:

$$H_0 = \frac{\alpha V^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z . \tag{3.11}$$

Тогда разность гидродинамических напоров H_{01} и H_{02} (полных удельных энергий E_{01} и E_{02}) в сечениях даст величину потери напора (потери энергии) h_W:

$$h_W = H_{01} - H_{02}, \tag{3.12}$$

или

$$h_W = E_{01} - E_{02}. \tag{3.13}$$

Частный случай УБ для элементарной струйки (потока) идеальной жидкости:

$$\frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2. \tag{3.14}$$

Правила применения уравнения Бернулли (УБ):

1. УБ справедливо для установившегося плавноизменяющегося движения.
2. УБ составляется с учётом получения одного неизвестного; если это невозможно, то в качестве второго используют уравнение неразрывности потока.
3. Сечения выбираются перпендикулярно направлению движения жидкости.
4. Сечения нумеруются по ходу движения жидкости.
5. Плоскость сравнения желательно проводить через центр тяжести нижнего сечения. В этом случае расстояние от плоскости сравнения до центра тяжести нижнего сечения $z_{нс} = 0$, а остальные z – положительны.

Напорная линия – это линия, соединяющая гидродинамические напоры (полную удельную энергию) в каждом сечении при графическом построении.

Гидравлический уклон I – уклон напорной линии – может быть определён как отношение потери напора (потери энергии) h_W к длине:

$$I = h_W / l, \tag{3.15}$$

где l – расстояние между сечениями потока движущейся жидкости.

Гидравлический уклон – величина положительная ($I > 0$). Для идеальной жидкости гидравлический уклон $I = 0$.

Пьезометрическим напором (потенциальным, статическим) H_p называют сумму пьезометрической и геометрической высот:

$$H_p = \frac{p}{\rho g} + z. \tag{3.16}$$

Пьезометрическая линия – это линия, соединяющая пьезометрические напоры в каждом сечении при графическом построении.

Пьезометрический уклон I_p – уклон пьезометрической линии – может быть определён как отношение разности пьезометрических напоров H_{p_1} и H_{p_2} в сечениях к длине l:

$$I_p = \frac{H_{p_1} - H_{p_2}}{l}. \tag{3.17}$$

По величине пьезометрический уклон принимает различные значения: отрицательные ($I_p < 0$), например, для потока реальной жидкости в расширяющейся трубе, и положительные ($I_p > 0$), например, для потока реальной жидкости в сужающейся трубе. Пьезометрический уклон равен нулю ($I_p = 0$), например, для потока идеальной жидкости в горизонтальной трубе постоянного диаметра.

Замечания к построению напорной и пьезометрической линий:

1.Напорная линия для движения идеальной жидкости всегда горизонтальна. Её нужно провести прежде, чем приступить к построению напорной линии для движения реальной жидкости.

2.Анализируя изменение скорости по длине потока, откладываем вниз от напорной линии величину скоростного напора $\alpha V^2 / 2g$ и получаем пьезометрическую линию.

3.При истечении в атмосферу пьезометрическая линия всегда приходит в центр тяжести выходного сечения, так как избыточное давление на выходе в этом случае равно нулю (p =0).

Путевые потери напора (потери энергии) h_l – потери на совершение работы по преодолению сил трения. Их ещё называют ***линейными потерями напора*** и определяют как при турбулентном, так и при ламинарном режиме движения для круглых труб по формуле Вейсбаха – Дарси:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}. \tag{3.18}$$

Для потоков произвольной формы сечения справедлива формула

$$h_l = \lambda \frac{l}{4R} \frac{V^2}{2g}, \tag{3.19}$$

где l, d, R, V – соответственно длина участка трубы или канала (расстояние между сечениями), диаметр трубы, гидравлический радиус, средняя скорость; λ – безразмерный коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси), зависящий от режима движения жидкости и от шероховатости поверхности.

В табл. 8 приведены некоторые полуэмпирические формулы для определения коэффициента Дарси в различных зонах сопротивления с использованием обозначения d / Δ – ***относительной шероховатости***, где Δ –эквивалентная шероховатость. За ***эквивалентную шероховатость*** принимают высоту выступов такой равномернозернистой шероховатости, которая обеспечивает те же потери напора, как и реальная разнозернистая шероховатость.

Таблица 8

Формулы для определения коэффициентов Дарси

Характер сопротивления	Расчётные формулы, их автор	Область применения формул
Гидравлически гладкие поверхности	$\lambda = 0{,}316 / Re^{0,25}$ (Г. Блазиус)	$4000 < Re < 10^5$
То же	$\lambda = (1{,}8\ lg\ Re - 1{,}5)^{-2}$ (П. К. Конаков)	$4000 < Re < 20d / \Delta$
То же, ламинарный режим	$\lambda = 64 / Re$ (Ж. Пуазейль)	$Re < 2320$
Любые поверхности при турбулентном режиме	$\lambda = 0{,}11(\Delta/d + 68/Re)^{0,25}$ (А. Д. Альтшуль)	$Re > 4000$
Абсолютно шероховатые поверхности	$\lambda = 0{,}11(d / \Delta)^{0,25}$ (Б. Л. Шифринсон)	$Re > 500\ d / \Delta$
То же	$\lambda = (1{,}74 + 2\ lg\ d / 2\Delta)^{-2}$ (И. Никурадзе)	$Re > 500\ d /\Delta$
То же	$\lambda = 124{,}6\ n^2 / \sqrt[3]{d}$ (Маннинг)	$Re > 500\ d / \Delta$
То же для открытых русел	$\lambda = 8g / C^2$	$Re > 500\ d / \Delta$

Численные значения эквивалентной шероховатости Δ, найденные опытным путём для различных труб, приведены в табл. 9.

Таблица 9

Значения эквивалентной шероховатости Δ

Характеристика поверхности труб и каналов	Δ, мм
Трубы из стекла и цветных металлов тянутые новые	0,001 – 0,01 (0,005)
Стальные трубы бесшовные новые	0,02 – 0,05 (0,03)
Стальные трубы бесшовные после нескольких лет эксплуатации	0,15 – 0,3 (0,2)
Стальные трубы сварные новые	0,03 – 0,1 (0,05)
Стальные трубы сварные старые заржавленные	0,8 – 1,5 (1,0)
Стальные водопроводные трубы, находящиеся в эксплуатации	1,2 – 1,5
Стальные трубы водяных систем отопления	0,2
Стальные нефтепроводы для средних условий эксплуатации	0,2
Чугунные трубы новые	0,2 – 0,5 (0,3)
Чугунные трубы, бывшие в эксплуатации, корродированные	0,3 – 1,5 (1,0)
Чугунные трубы водопроводные, бывшие в эксплуатации	1,4
Бетонные трубы при хорошей поверхности с затиркой	0,3 – 0,8 (0,5)
Бетонные трубы при среднем качестве работ	2,5
Железобетонные трубы	2,5

Примечание. В скобках даны средние значения эквивалентной шероховатости, используемые в предварительных расчётах.

***Коэффициент шероховатости** n*, который включён в формулу Маннинга (см. табл. 8), зависит от характеристики поверхности стенок трубы или канала. Численные значения коэффициентов шероховатости для некоторых видов труб, каналов и естественных русел приведены в табл. 10.

Таблица 10

Значения коэффициентов шероховатости *n*

Характеристика поверхности	*n*
Стальные новые цельнотянутые трубы. Хорошая штукатурка из чистого цемента. Весьма тщательно острoганные доски, хорошо пригнанные	0,01
Чугунные и гончарные новые трубы, хорошо уложенные и соединённые. Лучшая цементная (1:3) штукатурка. Хорошо острoганные доски	0,011
Водопроводные трубы в нормальных условиях, весьма чистые водосточные трубы. Весьма хорошее бетонирование. Настроганные доски, хорошо пригнанные	0,012
Водопроводные и водосточные трубы, несколько загрязнённые (в нормальных условиях). Кирпичная кладка хорошая и лучшая тесовая	0,013
Водопроводные и водосточные трубы, сильно загрязнённые. Значительно загрязнённые водотоки. Каналы с облицовкой из тёсаного камня, в хорошем состоянии	0,014
Обычная дренажная труба	0,013
Глазурованная труба канализационная	0,014
Средняя кирпичная кладка и средняя облицовка из тёсаного камня. Стальные клепаные спиральные трубы. Бетонные трубы в обычном состоянии	0,015
Обычная бутовая кладка на цементном растворе	0,02
Сухая бутовая кладка. Габионная кладка	0,03
Каналы и водотоки в естественном грунте:	
земляные каналы без растительности, вырытые землечерпалкой	0,028
каналы в лёссовом грунте чистые и правильной формы	0,02
каналы в лёссовом грунте засоренные и заросшие	0,027
каналы в гравии с песком	0,025
каналы в галечнике	0,027
каналы в скальном грунте	0,03
Бетонированные каналы в средних условиях	0,014
Неукреплённые земляные русла, плохо содержимые (заросли) или оказывающие значительное сопротивление течению (камни и т.п.). Реки в благоприятных условиях (прямой участок русла; отсутствие обвалов)	0,03
Неукреплённые земляные русла с неправильным профилем с большим количеством водорослей, камней и т.п.	0,035
Неукреплённые земляные русла, находящиеся в исключительно плохих условиях. Реки в ухудшенных условиях (извилистое ложе, отмели, водоросли). Земляные русла периодических водотоков (сухих логов) в относительно благоприятных условиях	0,04
Русла больших и средних рек, значительно засорённые, извилистые и частично заросшие, каменистые с неспокойным течением. Поймы больших и средних рек, сравнительно разработанные, покрытые нормальным количеством растительности (травы, кусты). Периодические (ливневые и весенние) водотоки, несущие во время паводка заметное количество наносов с крупногалечным или покрытым растительностью (травой и др.) ложем	0,05
Реки и поймы, весьма значительно заросшие, со слабым течением. Русла горных рек	0,08
Реки болотного типа	0,133
Потоки типа селевых, состоящие из грязи, камней и т.п.	0,2

В дорожном строительстве наибольшее применение имеют формулы Блазиуса для гладких труб и Маннинга для абсолютно шероховатых труб.

Местные потери напора (потери энергии) – это потери напора в местных сопротивлениях, как правило, на преодоление сил инерции.

Местные сопротивления – это участки локальных изменений геометрии потока. Таким образом, местные потери обусловлены изменением формы потока (вход в трубу), изменением диаметра трубы (внезапное расширение трубопровода, внезапное сужение трубопровода, постепенное расширение трубопровода – диффузор, постепенное сужение трубопровода – конфузор), изменением направления движения (поворот трубы).

Потери напора в местных сопротивлениях h_f определяются по формуле Вейсбаха:

$$h_f = \zeta \frac{V^2}{2g}, \tag{3.20}$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления; V– скорость потока за местным сопротивлением.

Величина коэффициента местного сопротивления ζ зависит не только от типа местного сопротивления (внезапное расширение, внезапное сужение, диафрагма, конфузор, поворот трубы, вход в трубу, задвижка и т.д.), но и от режима движения жидкости и её вязкости. В инженерной практике, в частности строительного профиля, чаще всего встречаются случаи местных сопротивлений при развитом турбулентном режиме.

Приведённые во многих справочных пособиях значения коэффициентов местных сопротивлений имеют экспериментальную основу и определены для квадратичной зоны сопротивления.

Для некоторых типов местных сопротивлений рекомендуются формулы:

при внезапном расширении трубопровода ($\omega_2 > \omega_1$)

$$\zeta = (\omega_2 / \omega_1 - 1)^2; \tag{3.21}$$

при внезапном сужении трубопровода ($\omega_2 < \omega_1$)

$$\zeta = 0{,}5\ (1 - \omega_2 / \omega_1), \tag{3.22}$$

где ω_1 и ω_2 – площади живых сечений соответственно перед и за местным сопротивлением.

Особенно резко изменяется коэффициент ζ при малых числах Рейнольдса, т.е. в условиях ламинарного режима. Поэтому при необходимости числовые значения коэффициентов местных сопротивлений определяют испытанием модели в лабораторных условиях.

В табл. 11 приведены коэффициенты местных сопротивлений на поворот трубы (колено) без закругления для различных углов поворота α, рекомендуемые при предварительных расчётах.

Таблица 11

Значения коэффициентов $\zeta_{кол}$ для колена без закругления

α, град.	20	40	60	80	90	100	120	140
$\zeta_{кол}$	0,05	0,14	0,36	0,74	0,98	1,26	1,86	2,43

В табл. 12 приведены числовые значения коэффициентов ζ наиболее часто встречающихся местных сопротивлений, рекомендуемые при ориентировочных расчётах.

Таблица 12

Значения коэффициентов часто встречающихся местных сопротивлений

Тип местного сопротивления	ζ
Вход в трубу при острых кромках	0,5
Вход в трубу со скруглёнными кромками	0,2
Переходный расширяющийся конус (диффузор) при $d_2 \approx 2d_1$	5,0
Переходный сужающийся конус (конфузор) при $d_2 \approx 0,5d_1$	0,1
Резкий поворот трубы на 90˚ (колено)	1,1
Плавный поворот трубы на 90˚ (колено)	0,15
Выход из трубы под уровень	1,0
Задвижка при полном открытии	0,15
Водопроводные краны при полном открытии	4,0
Всасывающий клапан с сеткой при насосах	2,5÷12,0
Дисковый клапан при полном открытии	0,1
Различные краны при полном открытии	5,0

Напор насоса $H_н$– это работа, которую совершает единица веса жидкости на пути от поверхности жидкости в колодце (питающем резервуаре) до её поверхности в наполняемом резервуаре. Эта работа равна разности гидродинамических напоров на выходе из насоса $H_{вых}$ и входе в него $H_{вх}$:

$$H_н = H_{вых} - H_{вх}. \tag{3.23}$$

Напор на входе в насос $H_{вх}$ определяется с учётом потери энергии во всасывающей линии $h_{Wв}$. Напор на выходе из насоса $H_{вых}$ определяется с учётом потери энергии в нагнетательной линии $h_{W\,н}$. Таким образом, напор насоса $H_н$ расходуется :

а) на подъём жидкости на геометрическую высоту $H_г$, т.е. от свободной поверхности жидкости в колодце (в питающем резервуаре) до её поверхности в наполняемом резервуаре;

б) на преодоление гидравлических сопротивлений во всасывающем и нагнетательном трубопроводах;

в) на преодоление разности давлений на поверхности жидкости в резервуарах.

Чаще всего в инженерной практике встречается случай, когда давление на поверхности жидкости в резервуарах одинаковое и равно атмосферному. Тогда напор насоса $H_н$ определяется по формуле

$$H_н = H_г + h_{W\,в} + h_{W\,н}. \quad (3.24)$$

Мощность насоса $N_{пол}$, т.е. полезная работа, затрачиваемая в единицу времени на перекачивание жидкости весом γQ, определяется по формуле

$$N_{пол} = H_н \gamma Q, \quad (3.25)$$

где γ – удельный вес жидкости; Q – расход.

В насосе имеются различные гидравлические и механические сопротивления, поэтому мощность насоса на валу $N_{нас}$ должна быть несколько большей, а именно:

$$N_{нас} = N_{пол} / \eta, \quad (3.26)$$

где η – коэффициент полезного действия насоса, учитывающий все виды сопротивления в насосе ($\eta < 1$).

Мощность насоса обычно выражается в лошадиных силах (л.с.) или в киловаттах (кВт), поэтому надо знать, что

1 л.с. = 75 кгс·м/с = 0,736 кВт,

1 кВт = 10^3 Вт = 10^3 Н·м/с ≈ 102 кгс·м/с = 1,36 л.с.

3.1.2. Напорные трубопроводы

Коротким напорным трубопроводом считается трубопровод, в котором местные потери напора h_f соизмеримы с путевыми потерями h_l:

$$\sum h_f \approx \sum h_l. \quad (3.27)$$

Типичными примерами короткого трубопровода являются сифон и всасывающая труба насоса.

Расчёт коротких трубопроводов в зависимости от постановки задачи сводится к определению либо суммарных потерь напора h_W, либо расхода жидкости в трубопроводе Q, либо диаметра трубы d. Для выполнения расчёта используются следующие зависимости:

а) уравнение баланса расхода (3.7);

б) уравнение баланса энергии (3.9);

в) уравнения для определения местных (3.20) и путевых (3.18) потерь напора.

В практических расчётах *общие потери напора* h_W представляют в виде суммы потери напора по длине на различных участках и потери напора на все виды местных сопротивлений в трубопроводе:

$$h_W = h_{l1} + h_{l2} + \ldots + h_{f1} + h_{f2} + \ldots \quad (3.28)$$

При определении *расхода жидкости в трубопроводе* Q можно воспользоваться следующей зависимостью:

$$Q = \mu_T \omega \sqrt{2gH}, \quad (3.29)$$

где H – действующий напор, который может быть определён как разность отметок уровней верхнего и нижнего бьефов при истечении под уровень или разность отметок уровня свободной поверхности питающего водоёма и пьезометрической линии в конце трубопровода при свободном истечении; ω – площадь выходного сечения; μ_T – коэффициент расхода трубопровода, который можно определить по формуле

$$\mu_T = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \sum \zeta_l + \sum \zeta_f}}, \tag{3.30}$$

где α – коэффициент Кориолиса; $\zeta_l = \lambda l / d$ – коэффициент потери по длине; ζ_f – коэффициент потери на местные сопротивления. Значения ζ_l и ζ_f следует включать в расчёт, учитывая отличие площади поперечного сечения трубопровода на участке, к которому они относятся, от площади выходного сечения. Значения λ можно определить в первом приближении по формулам, соответствующим квадратичной области сопротивления (см. табл. 8).

Диаметры трубопровода d непосредственно связаны с расходом и скоростью:

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}, \tag{3.31}$$

где V – скорость в трубопроводе, которая назначается из условия минимальной суммарной стоимости трубопровода и насосной установки с учётом расходов по эксплуатации. В табл.13 приведены экономические скорости и соответствующие расходы для средних экономических условий.

Таблица 13

Экономические скорости и соответствующие расходы

Диаметр *d*, мм	Экономические скорости *V*, м/с	Расходы *Q*, л/с	Диаметр *d*, мм	Экономические скорости *V*, м/с	Расходы *Q*, л/с
25	0,37	0,18	300	0,85	60,01
50	0,47	0,92	400	0,94	118,00
75	0,54	2,38	500	1,01	198,40
100	0,59	4,64	600	1,08	306,00
125	0,64	7,85	700	1,12	431,00
150	0,67	11,85	800	1,18	594,00
175	0,70	16,80	1000	1,27	1000,00
200	0,74	23,20	1100	1,31	1244,00
250	0,80	39,30	1200	1,35	1526,00

Примечание. Найденный диаметр трубопровода округляется до ближайшего значения по стандарту труб (табл. 14), при котором находится фактическая скорость.

В дорожном строительстве для водоснабжения обычно применяют трубопроводы небольшой протяжённости и преимущественно временные, устраиваемые в процессе производства работ (для бетонных и других работ). Поэтому можно пользоваться упрощёнными методами по нахождению наивыгоднейшего диаметра трубопровода. Для средних экономических условий Н. Н. Абрамов рекомендует следующие формулы:

$$d = Q^{0.42}; \tag{3.32}$$

$$V = 1{,}27\sqrt[3]{d}\,. \tag{3.33}$$

Сифон – это короткий самотечный трубопровод, часть которого расположена выше уровня жидкости в питающем резервуаре.

Таблица 14

Размеры труб

Материал труб	ГОСТ	Диаметр, мм									
Стальные сварные газопроводные	3262–75	6 80	8 90	10 100	15 125	20 150	25	32	40	50	65
Полиэтиленовые для подачи холодной воды	18599–83	10 90 315 -	12 110 355 -	16 125 400 -	20 140 450 -	25 160 500 -	32 180 560 -	40 200 630 -	50 225 710 1000	63 250 800 1200	75 280 900 -
Стальные бесшовные	8732–58	50 300	70 350	80 400	100	125	150	175	200	225	250
Железобетонные трубы безнапорные	6482–63	300	400	500	600	700	800	900	1000	1500	-

Длинным напорным трубопроводом считается трубопровод, в котором местные потери напора малы и несоизмеримы с путевыми потерями напора:

$$\sum h_f << \sum h_l. \tag{3.34}$$

Это обычно имеет место, если длина трубы $l > 1000d$, где d – диаметр трубы. Следовательно, к длинным трубопроводам в первую очередь можно отнести водопроводные сети и нефтепроводы.

Местные потери в длинных трубопроводах составляют обычно от 5 до 15 % общих потерь напора по длине, и тогда общие (суммарные) потери напора h_W можно определить по формуле

$$h_W = (1{,}05 \div 1{,}15)\sum h_l. \tag{3.35}$$

Расчёт длинных трубопроводов выполняется по упрощённой схеме. Из экономических соображений целесообразно назначать такие скорости течения жидкости, при которых имеет место область квадратичного сопротивления. Напорный трубопровод работает полным сечением и либо на всём протяжении, либо на отдельных участках имеет постоянное поперечное сечение, а движение равномерное. Поэтому основными расчётными формулами являются зависимости, полученные для равномерного движения, начиная с ***формулы Шези***:

$$V = C\sqrt{RI}\,, \tag{3.36}$$
$$Q = \omega C\sqrt{RI}\,, \tag{3.37}$$
$$K = \omega C\sqrt{R}\,, \tag{3.38}$$
$$Q = K\sqrt{I}\,, \tag{3.39}$$
$$I = h_l / l, \tag{3.40}$$
$$Q = K\sqrt{\frac{h_l}{l}}\,, \tag{3.41}$$
$$h_l = (Q / K)^2 l, \tag{3.42}$$
где C – коэффициент Шези; K – расходная характеристика (модуль расхода); I – гидравлический уклон.

Коэффициент Шези C зависит от диаметра трубы и шероховатости стенок. Для области квадратичного сопротивления C может быть определён по формуле Н. Н. Павловского:
$$C = (1/n)R^{y}\,, \tag{3.43}$$
где n – коэффициент шероховатости (табл. 8); R – гидравлический радиус (3.1); y – величина показателя степени, которая определяется в зависимости от шероховатости стенок (табл. 15).

Для напорных труб, укладываемых под насыпями дорог, а также для водопроводов рекомендуется формула Маннинга:
$$C = (1 / n)R^{1/6}. \tag{3.44}$$

Таблица 15

Показатель y в зависимости от шероховатости стенок

При $1/n$	≥ 100	70	55	40	25	12.5	5
y	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2

При проектировании напорных трубопроводов следует учитывать, что пропускная способность трубопроводов постепенно в процессе их эксплуатации изменяется, снижаясь в некоторых случаях (например, для трубопроводов водоснабжения) до 50 % расчетной и даже ниже. Шероховатость труб увеличивается вследствие процесса коррозии и инкрустации (образование отложений в трубах). Поправочные коэффициенты необходимо брать из справочника [4, 9].

Предельные допускаемые скорости в напорных водоводах зависят от условий прочности их материала и от содержания солей и наносов в воде. В металлических трубопроводах по условию прочности практически допускается любая скорость.

Модуль расхода K зависит от диаметра трубы и шероховатости стенок, т.е. от материала трубопровода. Расчёт водопроводных систем выполняют, используя значение расходной характеристики для бывших в эксплуатации труб. В табл. 16 приведены значения K для водопроводных труб в нормальных условиях при C, определённом по формуле Маннинга.

Простым трубопроводом считается трубопровод постоянного или переменного сечения с постоянным или переменным расходом, но не имеющий боковых ответвлений. В этом случае имеет место последовательное соединение всех участков с разными параметрами: диаметром d, длиной l, шероховатостью n, расходом Q, и при транспортировке жидкости от питателя к приёмнику часть общего расхода q может забираться в узлах. Питателями и приёмниками в гидросистемах могут являться насосы, гидродвигатели, аккумуляторы, резервуары и др.

Таблица 16

Значения расходных характеристик при n = 0,012

Диаметр d, мм	Расходная характеристика K, л/с	Диаметр d, мм	Расходная характеристика K, л/с
12	0,0406	300	1006
25	0,288	350	1517
40	4,666	400	2166
50	8,46	450	2965
63	15,63	500	3927
75	24,94	600	6386
100	53,72	700	9632
125	97,4	750	11580
150	158,4	800	13750
200	341,0	900	18830
225	467,0	1000	24930
250	628,5	1200	40550

Уравнение простого трубопровода имеет вид

$$H = \alpha V^2/2g + h_W, \tag{3.45}$$

где действующий напор H включает в себя не только перепад геометрических высот системы, но и разность давлений, если они не уравновешивают друг друга, на входе и на выходе; $\alpha V^2/2g$ – скоростной напор на выходе.

В водопроводных системах из экономических соображений обычно допускается скорость не выше 2 ÷ 3 м/с, чему соответствует скоростной напор на выходе 0,5 м. Действующий в системах напор чаще всего составляет десятки метров. Это даёт возможность при расчётах пренебречь скоростным напором в выходном сечении. Тогда уравнение (3.45) примет вид

$$H \approx h_W. \tag{3.46}$$

Потери напора h_W для области квадратичного сопротивления определяются по формуле (3.42).

Сложным трубопроводом считается трубопровод постоянного или переменного сечения с постоянным или переменным расходом (часть общего расхода забирается в узлах), имеющий ответвления в виде разветвлённой тупиковой или кольцевой (замкнутой) сети.

Расчёт сложных трубопроводов, как и расчёт простого, в зависимости от постановки задачи, сводится к определению:

- размеров труб по заданным в них расходам и перепадам напоров в питателях и приёмниках;
- перепадов напоров в питателях и приёмниках по заданным расходам в трубах заданных размеров;
- расходов в трубах заданных размеров по известным перепадам напоров.

При выполнении расчёта составляется система уравнений, включающая уравнения баланса расходов для каждого узла и уравнение баланса напоров (уравнение Бернулли) для каждой ветви трубопровода.

Параллельными трубопроводами называют трубопроводы, берущие начало в одной общей точке и заканчивающиеся в другой общей точке.

Независимо от числа труб, их длины и диаметров потери напора во всех параллельных трубопроводах равны между собой:

$$h_W = h_{W1} = h_{W2} = h_{W3} = \ldots = h_{Wn}. \qquad (3.47)$$

Расход в трубопроводе равен сумме расходов во всех параллельно соединённых трубах:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots + Q_n. \qquad (3.48)$$

Из вышеизложенного следует, что основные расчётные зависимости могут быть представлены в следующем виде:

$$h_w = \frac{Q^2}{\left(\sum \frac{K_n}{\sqrt{l_n}}\right)^2}, \qquad (3.49)$$

$$Q = \sqrt{h_w} \sum \frac{K_n}{\sqrt{l_n}}, \qquad (3.50)$$

$$Q_n = \sqrt{h_w} \frac{K_n}{\sqrt{l_n}}. \qquad (3.51)$$

Тупиковыми трубопроводами называют трубопроводы, в которых каждое ответвление заканчивается тупиком. В основу расчёта положены формулы (3.40), (3.41), (3.42) и уравнения баланса расходов и баланса напоров.

Для тупиковой сети справедлива зависимость (3.46). Поэтому расчёт начинается с выбора *магистрального трубопровода*, который должен иметь наибольшие расходы, быть самым длинным и обеспечить подачу воды на самые высокие отметки. Диаметры трубопроводов принимают как экономически наивыгоднейшие, исходя из предельных расходов. В табл. 17 приведены значения предельных расходов и расходных характеристик для новых водопроводных труб.

Кольцевой (замкнутый) разветвлённый трубопровод представляет собой в простейшем случае две параллельные трубы между узлами с одной или несколькими перемычками, соединяющими промежуточные сечения этих труб. По перемычкам некоторое количество жидкости перетекает из одной трубы в другую. Таким образом обеспечивается подача жидкости к узлам по крайней мере по двум трубам.

Таблица 17

Значения предельных расходов и расходных характеристик

Диаметр d, мм	Предельные расходы Q, л/с	Расходные характеристики K, л/с	Диаметр d, мм	Предельные расходы Q, л/с	Расходные характеристики K, л/с
50	-	9,9	400	96 –130	2394
75	-	28,7	450	130 –168	4259,3
100	до 5,4	61,4	500	168 – 237	4324,2
125	5,4 – 9,0	110,8	600	237 – 355	6999,3
150	9,0 –15,0	179,4	700	355 – 490	10517
200	15,–28,5	383,7	800	490 – 685	14964
250	28,5 – 45,0	692,1	900	685 – 882	20430
300	45,0 – 68,0	1120,6	1000	882 – 11200	26485
350	68 – 96	1684,2			

В кольцевом трубопроводе весь исходный напор идёт на преодоление сопротивлений по длине, т.е.

$$H = h_W. \qquad (3.52)$$

Расчёты кольцевых сетей сводятся различными приёмами к расчёту тупиковых трубопроводов.

3.1.3. Истечение жидкости через отверстие и насадки

Малым отверстием является отверстие, диаметр которого d не превышает одной десятой доли геометрического напора H:

$$d \leq 0{,}1H. \qquad (3.53)$$

Малое отверстие считается ***в тонкой стенке***, если толщина стенки t меньше трёх диаметров:

$$t < 3d. \qquad (3.54)$$

Насадком (насадкой) называется присоединённый к малому отверстию в тонкой стенке короткий патрубок длиной от 3,5 до 7,0 диаметров. Отверстие в тонкой стенке также может рассматриваться как насадок, если толщина этой стенки больше или равна 3,5d.

Расход жидкости при истечении через отверстие и насадок при постоянном напоре определяется по одной и той же формуле

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH_0}\,, \qquad (3.55)$$

где ω – площадь выходного сечения; H_0 – действующий напор (напор истечения) представляет собой разность значений гидростатического напора на свободной поверхности в резервуаре и в центре выходного сечения струи; μ – коэффициент расхода отверстия или насадка, зависит от условий сжатия и определяется по формуле

$$\mu = \varphi\varepsilon, \tag{3.56}$$

где φ – коэффициент скорости, зависит от местных сопротивлений и в общем случае может быть определён по формуле

$$\varphi = 1/\sqrt{1+\sum\zeta}\,; \tag{3.57}$$

ε – коэффициент сжатия струи, который определяет степень сжатия и равен отношению площади в сжатом сечении на выходе из отверстия ω_c к площади самого отверстия ω:

$$\varepsilon = \omega_c / \omega. \tag{3.58}$$

Полное совершенное сжатие имеет место в том случае, если отверстие расположено достаточно далеко от боковых стенок, дна резервуара и свободной поверхности жидкости, т.е. расстояние от любой стороны контура отверстия до направляющей стенки резервуара больше трёх соответствующих размеров отверстия. Тогда струя по всему периметру получает одинаковое сжатие. При невыполнении вышеназванного условия сжатие будет *несовершенным*, и коэффициент расхода $\mu_{нес}$ будет зависеть от площади отверстия ω и от общей площади стенки F:

$$\mu_{нес} = \mu(1 + 0{,}641\,\omega^2/F^2), \tag{3.59}$$

где μ – коэффициент расхода при полном совершенном сжатии (табл. 19).

Неполным сжатием называется сжатие, при котором струя получает сжатие на выходе не по всему периметру, например, при расположении прямоугольного отверстия у дна боковой стенки резервуара. В этом случае боковая стенка и дно играют роль направляющих плоскостей, вдоль которых сжатие струи возможно. Коэффициент расхода в случае неполного сжатия $\mu_н$ определяется по формуле

$$\mu_н = \mu(1 + cn/\chi), \tag{3.60}$$

где μ – коэффициент расхода при полном совершенном сжатии (табл. 18,19); χ – периметр всего отверстия; n – периметр той части контура отверстия, на которой отсутствует сжатие; c – коэффициент, который для круглых отверстий равен 0,13 и для прямоугольных – 0,15.

При полном совершенном сжатии струи коэффициенты расхода рекомендуется определять в зависимости от формы отверстия и напора. В табл. 18 и 19 приведены значения для круглых и квадратных малых отверстий в тонкой стенке.

Значения коэффициентов расхода μ для малого круглого отверстия в тонкой стенке при полном совершенном сжатии в зависимости от числа Рейнольдса *Re* по рекомендациям А. Д. Альтшуля приведены ниже:

Re	15 000	25 000	50 000	100 000	250 000	500 000	$\geq 10^6$
μ	0,638	0,623	0,61	0,603	0,597	0,594	0,593

Таблица 18

Коэффициенты расхода для круглых отверстий (для воды)

Напор над центром отверстия, м	Диаметр отверстия, см				
	0,6	1,5	3,0	12,2	30,5
0,15	-	0,627	0,615	0,596	-
0,30	0,644	0,617	0,608	0,598	0,591
0,50	0,636	0,612	0,605	0,599	0,594
1,07	0,625	0,606	0,602	0,599	0,596
1,52	0,621	0,605	0,601	0,598	0,596
3,05	0,611	0,601	0,598	0,597	0,595
6,10	0,601	0,598	0,596	0,596	0,594
15,00	0,596	0,595	0,594	0,594	0,593
30,00	0,593	0,592	0,592	0,592	0,592

Таблица 19

Коэффициенты расхода для малых квадратных отверстий в тонкой стенке (для воды)

Напор над центром отверстия, м	Сторона квадратного отверстия, см			
	1	3	12	18
0,5	0,626	0,609	0,605	0,603
1,0	0,620	0,607	0,605	0,604
2,0	0,614	0,605	0,604	0,603
6,0	0,605	0,602	0,601	0,601
15,0	0,601	0,600	0,600	0,599
30,0	0,598	0,598	0,598	0,598

В табл. 20 приведены средние значения коэффициентов сжатия, скорости и расхода (коэффициентов истечения) для круглых отверстий при полном совершенном сжатии и насадок.

Значения коэффициентов истечения ε, φ, μ меняются в зависимости от угла конусности β. Так, например, для конически сходящегося насадка коэффициент расхода μ то увеличивается, то уменьшается:

угол конусности β	1°	5°	10°	13°	16°	20°	30°	45°
коэффициент расхода μ	0,85	0,92	0,94	0,945	0,94	0,92	0,9	0,86

В табл. 20 приведены значения для оптимальных углов конусности, при которых коэффициенты расходов наибольшие.

Конически сходящиеся насадки широко применяют в инженерной практике (в соплах гидромониторов, в пожарных брандспойтах, в гидроэлеваторах – водоструйных насосах и т.п.), когда нужно получить большую выходную скорость струи, что увеличивает дальность полёта и силу удара струи.

Таблица 20

Значения коэффициентов ε, φ, μ

Отверстие или тип насадка	ε	φ	μ
Малое круглое отверстие при $Re \geq 10^5$	0,64	0,97	0,62
Насадок внешний цилиндрический (Вентури)	1	0,82	0,82
Насадок внутренний цилиндрический (насадок Борда)	1	0,71	0,71
Насадок конический сходящийся при β = 13° 24′	0,982	0,963	0,946
Насадок конический расходящийся при β = 5 – 7°	1	0,45–0,5	0,45–0,5
Насадок коноидальный	1	0,98	0,98

Уравнение осевой линии струи записывается в следующем виде:

$$y = x^2 / \left(4\varphi^2 H\right), \tag{3.61}$$

где расстояние x – *дальность полёта струи*, которое определяется по формуле

$$x = 2\varphi\sqrt{Hy}\ . \tag{3.62}$$

Конически расходящиеся насадки применяют в тех случаях, когда необходимо уменьшить скорость истечения, например, для подачи смазочных масел, когда необходимо увеличить пропускную способность при относительно малых скоростях, а также когда необходимо иметь значительный вакуум на входном участке, например, в водоструйных и пароструйных насосах, эжекторах, инжекторах и т.п.

Коноидальные насадки имеют очертания вытекающей струи из отверстия, поэтому имеют наибольшую пропускную способность при всех прочих равных условиях. Их применяют в пожарных брандспойтах, но редко, так как изготовление их очень сложное.

Нормальная работа насадка (эффект насадка) возможна при создании вакуума в зоне сжатия на входе жидкости в насадок. Условия нормальной работы насадка следующие:

1) Обеспечение зарядки насадка во время пуска, т.е. изоляция зоны сжатия от доступа воздуха через выходное сечение.

2) Длина насадка должна быть в пределах $l = (3{,}5 \div 7{,}0)d$. Нижний предел связан с длиной зоны сжатия, верхний – с влиянием сопротивлений по длине за зоной сжатия.

3) Вакуум в зоне сжатия не должен превышать предельного, что требует ограничения напора: $H_0 < 12{,}5$ м водного столба.

Нарушение каждого из перечисленных условий приводит к работе насадка неполным сечением, то есть в режиме отверстия с μ = 0,62.

При истечении из закрытого резервуара с давлением p_0 на поверхности жидкости *скорость истечения* V находят по формуле

$$V = \varphi\sqrt{2gH + 2(p_0 - p_a)/\rho}\,, \tag{3.63}$$

где p_a – атмосферное давление; ρ – плотность жидкости.

Истечение жидкости при переменном напоре встречается в инженерной практике при резком увеличении расхода из резервуара, при опорожнении резервуаров, при истечении из дозирующих баков биофильтров, при наполнении резервуара с постоянным притоком жидкости и т.п.

Время понижения или повышения уровня жидкости в резервуаре t определяется по формуле

$$t = \frac{2\Omega(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\mu\omega\sqrt{2g}}, \tag{3.64}$$

где Ω – площадь поперечного сечения резервуара; H_1 – начальный напор; H_2 – конечный напор; μ – коэффициент расхода отверстия или насадка; ω – площадь выходного сечения.

Если $H_1 > H_2$, то происходит опорожнение, если $H_1 < H_2$, то резервуар наполняется.

При полном опорожнении резервуара $H_2 = 0$, и тогда формула (3.65) примет следующий вид:

$$t = \frac{2\Omega\sqrt{H_1}}{\mu\omega\sqrt{2g}} = \frac{2\Omega H_1}{\mu\omega\sqrt{2gH_1}} = \frac{2W}{Q}, \tag{3.66}$$

где W – первоначальный объём жидкости в резервуаре при напоре H_1; Q – расход жидкости при постоянном напоре H_1.

Из (3.66) видно, что время полного опорожнения резервуара в два раза больше времени истечения того же объёма жидкости при постоянном напоре.

При истечении жидкости через отверстие и насадки под уровень (затопленное истечение) расход жидкости Q определяется по формуле, аналогичной формуле (3.55):

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gz}\,, \tag{3.67}$$

где z – расстояние от горизонта жидкости в первом резервуаре до горизонта жидкости во втором резервуаре.

3.2. Примеры решения задач

Пример 1. Определить скорость на всех участках трубопровода переменного сечения, присоединённого к резервуару (рис.52), расход и построить пьезометрическую и напорную линии. Расстояние от свободной поверхности воды в резервуаре до центра тяжести выходного сечения трубопровода H = 10 м. Манометрическое давление на поверхности воды в резервуаре p = 0,6 ат. Диаметры трубопровода на соответствующих участках: d_1 = 125 мм, d_2 = 63 мм, d_3 = 100 мм, $d_4 = d_5$ = 75 мм. Вода из трубопровода вытекает в атмосферу. Решить задачу без учёта сопротивлений (жидкость идеальная).

Решение. Для определения скорости в конечном сечении трубопровода воспользуемся уравнением Бернулли (3.14). Первое сечение (0–0) проведём по свободной поверхности жидкости в резервуаре, второе сечение – на выходе из трубопровода (5–5). Плоскость сравнения *O–O* проведём по горизонтальной оси трубопровода. Тогда

$$\frac{u_0^2}{2g}+\frac{p_0}{\rho g}+z_0=\frac{u_5^2}{2g}+\frac{p_5}{\rho g}+z_5.$$

В этом уравнении $u_0 \approx 0$, т.к. уровень воды в резервуаре поддерживается постоянным (установившееся движение); $p_0 = p$; $z_0 = H+h$ (рис. 52); $p_5 = 0$ (избыточное давление); $z_5 = h$. Тогда уравнение примет вид:

$$\frac{p}{\rho g}+H+h=\frac{u_5^2}{2g}+h \text{ или } \frac{p}{\rho g}+H=\frac{u_5^2}{2g};$$

$$u_5=\sqrt{2g\left(H+\frac{p}{\rho g}\right)} = \sqrt{2\cdot 9{,}81\cdot\left(10+\frac{0{,}6\cdot 9{,}81\cdot 10^4}{10^3\cdot 9{,}81}\right)}=17{,}7 \text{ м/с}.$$

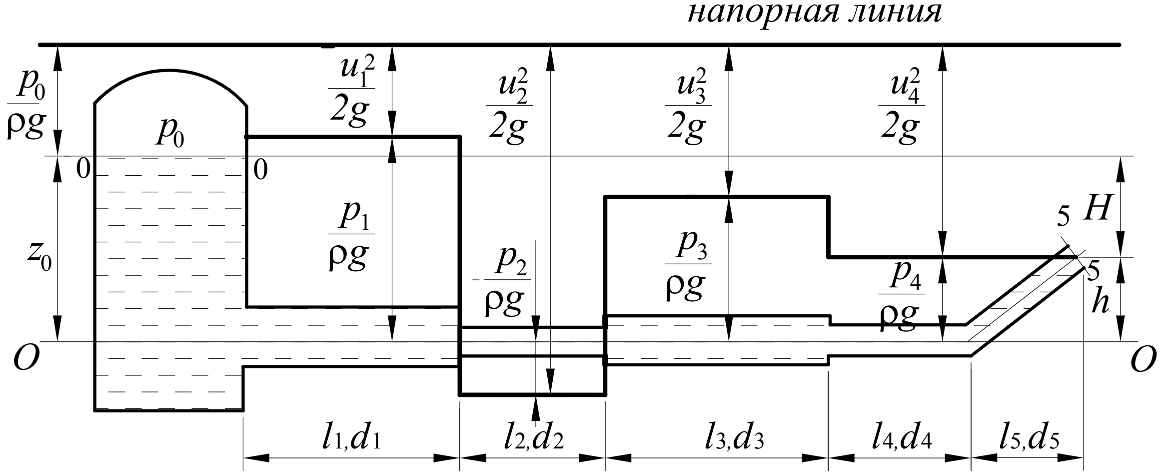


Рис. 52. К примеру 1

При определении скорости на всех участках трубопровода воспользуемся уравнением неразрывности потока (3.7) и запишем его для первого (1–1) и пятого (5–5) сечений, заменив среднюю скорость V на местную u:

$\omega_1 u_1 = \omega_5 u_5$;

тогда $u_1 = u_5 \omega_5 / \omega_1$. Т.к. отношение площадей сечений в круглой трубе равно квадрату отношения соответствующих диаметров: $\omega_5/\omega_1 = (d_5/d_1)^2$, то

$u_1 = u_5 (d_5 / d_1)^2$ = 17,7(75/125)^2 = 10,6 м/с.

Аналогично определим скорости на других участках:

$u_2 = u_5 (d_5 / d_2)^2$ = 17,7(75/63)^2 = 24,9 м/с;

$u_3 = u_5 (d_5 / d_3)^2$ = 17,7(75/100)^2 = 9,95 м/с.

$u_4 = u_5 = 17{,}7$ м/с, потому, что $d_4 = d_5$.

Расход определяем по любому сечению, используя формулу (3.5).

$Q = \omega_1 u_1 = u_1 \pi d_1^2 / 4$ = 10,6·3,14·0,125^2/4 = 0,141 м^3/с = 141 л/с.

Построение напорной линии начинают с определения гидродинамического напора на свободной поверхности жидкости по формуле (3.11):

$$H_0 = \frac{p}{\rho g} + H .$$

Избыточному давлению p = 0,6 ат соответствует пьезометрическая высота $p/\rho g$ = 6,0 м. Тогда

H_0 = 6,0 + 10,0 = 16,0 м.

Откладываем вверх от плоскости сравнения *O–O* в выбранном масштабе величину гидродинамического напора H_0= 16,0 м и проводим горизонтальную линию, которая является напорной линией для данного трубопровода.

Пьезометрическая линия проходит ниже напорной линии на расстоянии скоростного напора, поэтому определяем скоростные напоры на каждом участке трубопровода:

$u_1^2 / 2g$ = 10,6^2/(2·9,81) = 5,7 м;

$u_2^2 / 2g$ = 31,6 м;

$u_3^2 / 2g$ = 5,05 м;

$u_4^2 / 2g$ =16,0 м;

$u_5^2 / 2g$ = 16,0 м.

Откладываем вниз от напорной линии величину скоростного напора $u_1^2 / 2g$ и проводим горизонтальную линию до конца первого участка. На втором участке вниз от напорной линии откладываем соответствующую величину скоростного напора $u_2^2 / 2g$ и проводим горизонтальную линию на протяжении всего второго участка, и т.д. Полученные горизонтальные отрезки соединяем в последовательности между собой. Эта ломаная линия и является пьезометрической линией для данного трубопровода (см. рис.52).

Пример 2. Применяемые в водоснабжении и канализации трубы имеют минимальный диаметр d = 12 мм и максимальный диаметр d = 3500 мм. Расчётные скорости движения воды в них V = 0,5÷4,0 м/с. Определить минимальное и максимальное значения чисел Рейнольдса и режим движения воды в этих трубопроводах.

Решение. Температура воды в системах водоснабжения и канализации может изменяться от 0 до 30° С; соответственно кинематическая вязкость (см. табл. 5)

$\nu_{0^\circ} = 1{,}79\cdot10^{-6}$ м^2/с и $\nu_{30^\circ} = 0{,}81\cdot10^{-6}$ м^2/с.

Минимальное число Рейнольдса по формуле (3.6) будет при d = 12 мм, V = 0,5 м/с и $\nu_{0^\circ} = 1{,}79\cdot10^{-6}$ м^2/с:

$Re_{min} = Vd / \nu_{0^\circ} = 0{,}5\cdot0{,}012 / (1{,}79\cdot10^{-6}) = 3352$.

Максимальное число Рейнольдса

$Re_{max} = 4{,}0\cdot3{,}5 / (0{,}81\cdot10^{-6}) = 17\,260\,000$.

Даже минимальное значение числа Рейнольдса больше критического значения $Re_к$ = 2320, поэтому в трубопроводах систем водоснабжения и канализации режим движения воды всегда турбулентный.

Пример 3. По трубопроводу постоянного поперечного сечения перекачивается жидкость плотностью ρ = 950 кг/м^3. Избыточное давление в начале трубопровода $p_1 = 3\cdot10^5$ Па. Пренебрегая потерями напора при движении жидкости, определить максимальный угол наклона трубопровода к горизонту, чтобы давление в конце трубопровода было равно атмосферному. Длина трубопровода равна 5 км.

Решение. Из уравнения Бернулли (3.9) определим разность геометрических высот центров тяжести сечений в начале и в конце трубопровода z_1 относительно плоскости сравнения, проходящей через центр тяжести сечения в конце трубопровода (z_2 = 0). Скоростные напоры в сечениях равны, т.к. трубопровод постоянного поперечного сечения. Тогда уравнение (3.9) примет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g}.$$

$$z_1 = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{-3\cdot10^5}{10^3\cdot9{,}81} = -32{,}3 \text{ м}.$$

Знак минус указывает на то, что трубопровод имеет наклон вверх. Определим угол наклона трубы α к горизонту чисто геометрически:

$\alpha = \arcsin z_1/l = \arcsin 32{,}3/5000 = \arcsin 0{,}00646 = 0^\circ22'$.

Пример 4. По самотечной железобетонной трубе длиной l = 100 м из водоёма $А$ в колодец $Б$ поступает вода с расходом Q = 150 л/с (рис.53). При входе в трубу устроена сетка. Разность горизонтов в водоёме и колодце не должна превышать $H \leq 0{,}4$ м. Скорость в трубе $V \leq 1{,}0$ м/с. Определить необходимый диаметр такой самотечной трубы.

Решение. Задаваясь скоростью в трубе $V = 1{,}0$ м/с, определим диаметр трубы по формуле (3.31):

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.15}{3.14 \cdot 1.0}} = 0.44 \text{ м}.$$

Принимаем ближайшее значение диаметра по стандарту $d_0 = 0{,}5$ м (см. табл. 14) и находим скорость при этом диаметре по формуле (3.4)

$V_0 = Q / \omega = 4Q / \pi d_0^2 = 4 \cdot 150 \cdot 10^{-3} / (3{,}14 \cdot 0{,}5^2) = 0{,}76$ м/с.

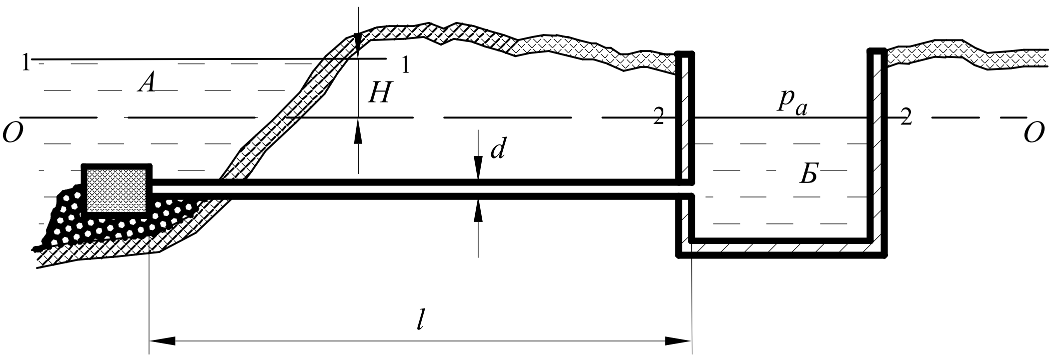


Рис. 53. К примеру 4

Условие выполняется.

Для проверки выполнения условия по разности горизонтов запишем уравнение Бернулли (3.9) для сечений 1–1 и 2–2 относительно плоскости сравнения O–O, проходящей через сечение 2–2, пренебрегая скоростными напорами, как малыми величинами, и принимая на поверхности водоёма и колодца давление, равное атмосферному: $H_0 = h_W$.

Общие потери напора h_W складываются из местных потерь на входе во всасывающую трубу с сеткой и потерь на выходе из трубы под уровень и путевых потерь по длине трубопровода. Используя формулы (3.18) и (3.20), перепишем уравнение в следующем виде:

$H_0 = (\zeta_{вх} + \zeta_{вых} + \lambda l/d) V_0^2 / 2g$.

Коэффициенты местных сопротивлений на вход и выход определяем по табл. 12: $\zeta_{вх} = 0{,}5$; $\zeta_{вых} = 1{,}0$.

Для определения коэффициента Дарси λ необходимо выяснить режим движения воды в трубе. Для этого принимаем кинематическую вязкость при $t = 10^o$ $\nu_{10^\circ} = 1{,}31 \cdot 10^{-6}$ м^2/с (см. табл. 5). Тогда число Рейнольдса по формуле (3.6) будет равно:

$Re = V_0\, d_0 / \nu = 0{,}76 \cdot 0{,}5/(1{,}31 \cdot 10^{-6}) = 290\ 000$ – режим движения турбулентный.

Эквивалентная шероховатость для железобетонных труб $\Delta = 2{,}5$ мм (см. табл. 9), тогда 500 d_0 /Δ =100 000. По табл. 8 выбираем формулу для определения коэффициента Дарси:

$\lambda = 124{,}6\, n^2 / \sqrt[3]{d}$.

Коэффициент шероховатости для бетонных труб в обычном состоянии n = 0,015 (см. табл. 10). Тогда

$\lambda = 124{,}6 \cdot 0{,}015^2 / \sqrt[3]{0.5} = 0{,}035$.

Разность горизонтов в водоёме и колодце для принятого диаметра составит

$H_0 = (0{,}5+1{,}0+0{,}035 \cdot 100/0{,}5)0{,}76^2/(2 \cdot 9{,}81) = 0{,}1$ м, что меньше допустимого значения:

$H_0 < H$.

Условие выполняется.

Пример 5. Определить диаметр железобетонного дюкера (рис.54), проложенного под автомобильной дорогой, и разность между подпорным и бытовым горизонтами, если длина дюкера L = 50 м, расход воды в дюкере Q = 2,5 м^3/с и допускаемая скорость V= 3,0 м/с.

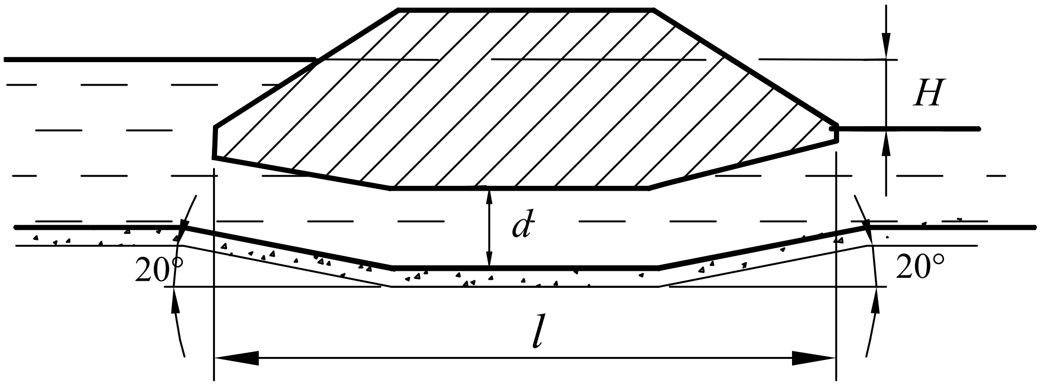


Рис. 54. К примеру 5

Решение. Рассмотрим дюкер как цилиндрический насадок.

Определяем диаметр дюкера по формуле (3.31)

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}5}{3{,}14 \cdot 3{,}0}} = 1{,}03 \text{ м.}$$

Примем ближайший стандартный диаметр (см. табл. 14) d_0 = 1,0 м. Тогда скорость в дюкере равна

$V_0 = 4Q / \pi d_0^2 = 4 \cdot 2{,}5/(3{,}14 \cdot 1{,}0^2) = 3{,}18$ м/с.

Расход воды в дюкере определяется по формуле (3.55). Если пренебречь скоростью подхода, как малой величиной, то $H_0 \approx H$, т.е. действующий напор равен разности между подпорным и бытовым горизонтами. Тогда

$$H = \frac{Q^2}{\mu^2 \omega^2 2g}.$$

Для вычисления коэффициента расхода дюкера μ необходимо определить коэффициенты местных сопротивлений:

на вход в трубу с острыми кромками (см. табл. 12) $\zeta_{вх} = 0{,}5$;

на колено при угле поворота $\alpha = 20^o$ (см. табл. 11) $\zeta_{кол} = 0{,}05$;

на выход из трубы под уровень (см. табл 12) $\zeta_{вых} = 1{,}0$.

Коэффициент Дарси λ определим по формуле (см. табл. 8), в которой коэффициент Шези C зависит от шероховатости поверхности дюкера. Примем коэффициент шероховатости $n = 0{,}015$ для бетонных труб в обычном состоянии (см. табл. 10). Для круглых труб гидравлический радиус

$R = d_0 /4 = 1{,}0/4 = 0{,}25$ м.

Тогда по формуле Маннинга (3.44) коэффициент Шези равен

$C = R^{1/6}/n = 0{,}25^{1/6}/0{,}015 = 59{,}26$ м^{0,5}/с.

$\lambda = 8g / C^2 = 8 \cdot 9{,}81/59{,}26^2 = 0{,}022$.

Тогда, принимая $\varepsilon = 1$ и $\mu = \varphi$, вычисляем по формуле (3.57) коэффициент расхода дюкера:

$$\mu = 1/\sqrt{1 + \zeta_{вх} + 2\zeta_{кол} + \zeta_{вых} + \lambda l/d} = 1/\sqrt{1 + 0{,}5 + 2 \cdot 0{,}05 + 1{,}0 + 0{,}022 \cdot 50/1{,}0} =$$
$$= 0{,}52.$$

Площадь живого сечения для круглой трубы

$\omega = \pi d^2/4 = 3{,}14 \cdot 1{,}0^2/4 = 0{,}79$ м^2.

Определим разность между подпорным и бытовым горизонтами воды:

$H = 2{,}5^2/(0{,}52^2 \cdot 0{,}79^2 \cdot 2 \cdot 9{,}81) = 1{,}89$ м.

Пример 6. Центробежный насос *А* (рис.55) засасывает воду из колодца *Б* по трубе длиной $l = 30{,}0$ м в количестве $Q = 65{,}0$ л/с и нагнетает эту воду по трубе длиной $L = 200$ м на высоту $h = 20{,}0$ м в напорный бак *В*. Всасывающая труба при входе имеет сетку и обратный клапан. На нагнетательной трубе поставлена задвижка с открытием $s/d = 7/8$. Допускаемая скорость в трубопроводе $V_{доп} = 1{,}0 \div 2{,}0$ м/с. Коэффициент полезного действия насоса $\eta = 0{,}8$.

Определить мощность на валу насоса, а также положение центра насоса относительно уровня воды в колодце $h_н$ из условия, чтобы вакуум у насоса был не более 7,5 м вод. ст. В расчёте принять коэффициент шероховатости стальных труб $n = 0{,}013$ с учётом загрязнения труб за период их эксплуатации. Температуру принять 10 ºС.

Решение. Зададимся скоростью $V = 1{,}5$ м/с и определим диаметр всасывающей и нагнетательной труб по формуле (3.30)

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 65 \cdot 10^{-3}}{3{,}14 \cdot 1{,}5}} = 0{,}23 \text{ м.}$$

Принимаем согласно стандарту (см. табл. 14) $d_0 = 250$ мм. Тогда скорость при $d_0 = 250$ мм

$$V_0 = \frac{4Q}{\pi d_0^2} = \frac{4 \cdot 68 \cdot 10^{-3}}{3{,}14 \cdot (250 \cdot 10^{-3})^2} = 1{,}32 \text{ м/с}.$$

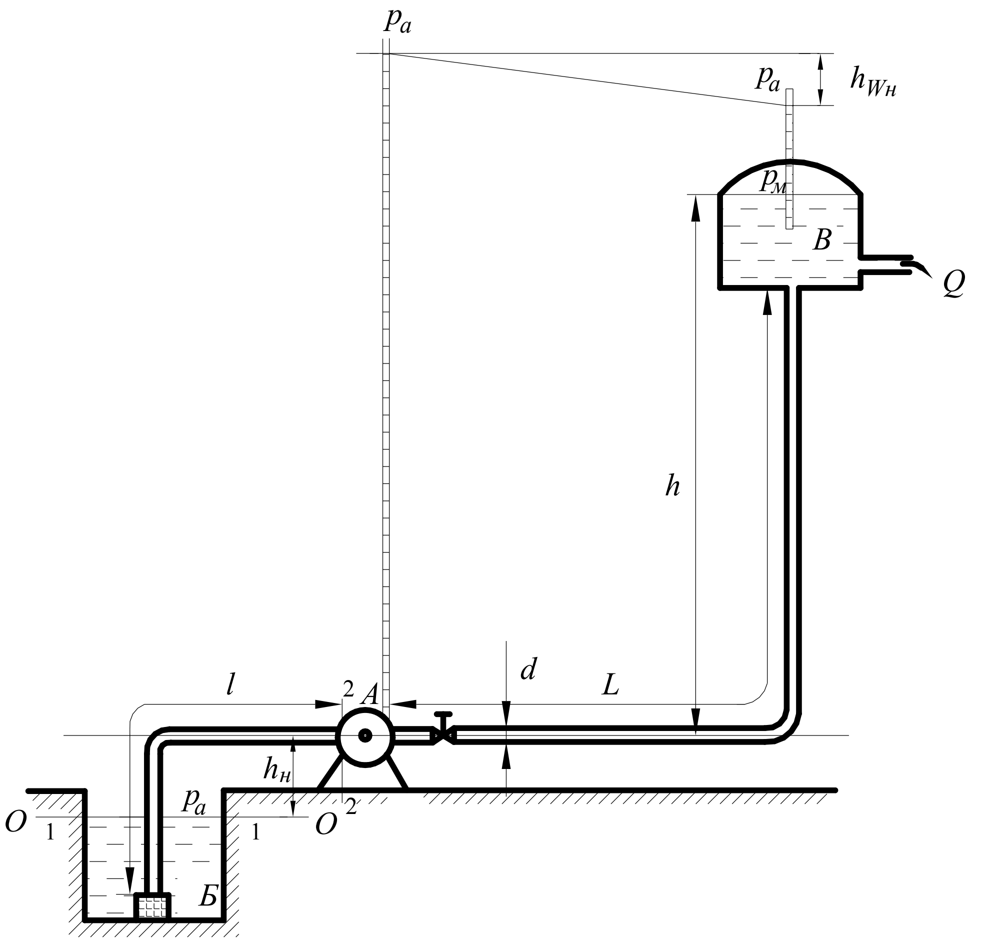


Рис. 55. К примеру 6

Для определения положения центра насоса относительно уровня воды в колодце запишем уравнение Бернулли (3.9) для сечений 1–1 и 2–2 (рис. 53). Плоскость сравнения *О–О* проведём по уровню воды в колодце.

$$\frac{\alpha V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + h_{Wв}.$$

Скоростным напором $\alpha V_1^2 / 2g$ пренебрегаем, как малой величиной. Сечение 1–1 проведено по свободной поверхности воды в колодце *Б*, следовательно, избыточное давление $p_1 = 0$.

$z_2 - z_1 = h_н$;

$V_2 = V_0 = 1{,}32$ м/с.

$\alpha = 1{,}1$.

Из условия задачи давление в сечении 2–2 меньше атмосферного, т.к. находится выше плоскости сравнения *О–О*, следовательно,

$(p_1 - p_2)/\rho g = h_{вак} = 7{,}5$ м.

Тогда уравнение Бернулли примет следующий вид:

$$h_{вак} = h_н + \frac{\alpha V_0^2}{2g} + h_{Wв}.$$

Вычислим общие потери напора $h_{W_в}$ во всасывающей трубе длиной l, используя формулы (3.18) и (3.20).

Из «Справочника по гидравлическим расчётам» под редакцией Киселёва П. Г.[9] выпишем значения коэффициентов местных сопротивлений при $d_0 = 250$ мм:

а) на вход (сетка и обратный клапан) $\zeta_{вх} = 4{,}45$;

б) на колено $\zeta_{90^\circ} = 0{,}4$.

Для определения коэффициента Дарси вычислим значение числа Рейнольдса при 10 ºС, определив кинематическую вязкость по табл. 5:

$Re = Vd/\nu = 1{,}32 \cdot 0{,}25/(1{,}31 \cdot 10^{-6}) = 250\,000$.

По табл. 9 определим эквивалентную шероховатость используемых труб: $\Delta = 1{,}0$ мм.

Тогда значение $500\, d/\Delta = 500 \cdot 250/1{,}0 = 125\,000$.

По табл. 8 выбираем соответствующую формулу для определения λ (формула Маннинга):

$\lambda = 124{,}6\, n^2/\sqrt[3]{d} = 124{,}6 \cdot 0{,}013^2/\sqrt[3]{0.25} = 0{,}0336$.

Тогда

$$h_{Wв} = \left(\zeta_{вх} + \zeta_{90^\circ} + \lambda\frac{l}{d}\right)\frac{V_0^2}{2g} = \left(4{,}45 + 0{,}4 + 0{,}0336\frac{30}{25}\right)\frac{V_0^2}{2g} = 8{,}87\frac{V_0^2}{2g}.$$

Подставим эти значения в уравнение и определим положение центра насоса относительно уровня воды в колодце $h_н$:

$$h_н = h_{вак} - \frac{\alpha V_0^2}{2g} - 8{,}87\frac{V_0^2}{2g} = 7{,}5 - 9{,}97\frac{1{,}32^2}{2 \cdot 9{,}81} = 6{,}6\,\text{м}.$$

Для определения напора насоса вычислим общие потери напора $h_{Wн}$ в нагнетательной трубе.

Из «Справочника по гидравлическим расчётам» [9] выпишем значения коэффициентов местных сопротивлений при $d_0 = 250$ мм:

а) на задвижку при открытии $s/d = 7/8$ $\zeta_з = 0{,}07$;

б) на колено $\zeta_{90^\circ} = 0{,}4$;

в) на выход $\zeta_{вых} = 1{,}0$.

Тогда общие потери напора $h_{Wн}$ в нагнетательной трубе определяем, используя формулы (3.18) и (3.20):

$$h_{Wн} = \left(\zeta_з + \zeta_{90^\circ} + \zeta_{вых} + \lambda\frac{L}{d}\right)\frac{V_0^2}{2g} = \left(0{,}07 + 0{,}4 + 1{,}0 + 0{,}0336\frac{200}{25}\right)\frac{1{,}32^2}{2 \cdot 9{,}81} =$$

$= 2{,}51$ м.

Определим напор насоса:

$H = h_{вак} + h + h_{Wн} = 7{,}5 + 20{,}0 + 2{,}51 = 30{,}01$ м.

Определим мощность на валу насоса, используя формулы (3.25) и (3.26):

$N_{нас} = \gamma QH / \eta = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 65 \cdot 10^{-3} \cdot 30{,}01/0{,}8 = 23992$ Нм/с = 24 кВт= = 32,6 л.с.

Если электродвигатель установлен на одном валу с насосом, то полезная мощность этого двигателя должна быть $N_{пол}$ = 24 кВт. В случае ремённой передачи необходимо разделить N на коэффициент полезного действия этой передачи.

Пример 7. Подобрать диаметры участков трубопровода, изображённого на рис. 56, и установить необходимую высоту водонапорной башни при следующих данных: $l_{АБ}$ = 600 м, $l_{БВ}$ = 300 м, $l_{ВГ}$ = 250 м, $l_{БД}$ = 400 м, $l_{ВЖ}$ = 150 м, $l_{ЖЕ}$ = 150 м, $l_{ЖЗ}$ = 200 м; расходы в конце участков $Q_Г$ = 18 л/с, $Q_З$ = 12 л/с, $Q_Е$ = 16 л/с, $Q_Д$ = 30 л/с. Местность горизонтальная. В конечных пунктах сети должен быть обеспечен свободный напор $h_{св}$ = 12 м.

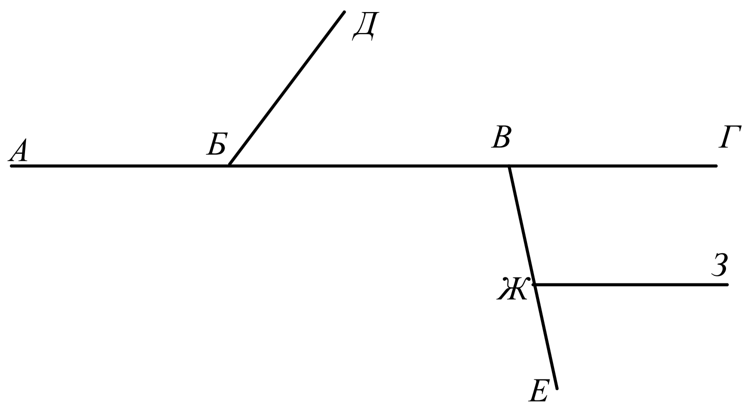


Рис. 56. К примеру 7

Решение. Изображённый на рис. 56 трубопровод является *длинным сложным тупиковым.* Устанавливаем расчётные расходы для всех участков сети:

$Q_{АБ} = Q_Г + Q_З + Q_Е + Q_Д = 18+12+16+30 = 76$ л/с;

$Q_{БВ} = Q_Г + Q_З + Q_Е = 18+12+16 = 46$ л/с;

$Q_{ВГ} = Q_Г = 18$ л/с;

$Q_{ЖЕ} = Q_Е = 16$ л/с;

$Q_{БД} = Q_Д = 30$ л/с;

$Q_{ВЖ} = Q_З + Q_Е = 12+16 = 28$ л/с.

За главную линию тупиковой сети (магистраль) принимаем линию *АБВГ* как наиболее длинную и нагруженную линию.

Р а с ч ё т м а г и с т р а л и.

По табл. 17 определяем для заданных расчётных расходов диаметры труб на всех участках магистрали и их расходные характеристики:

$Q_{АБ}$ =76 л/с → $d_{АБ}$ = 350 мм → $K_{АБ}$ = 1684,2 л/с;
$Q_{БВ}$ = 46 л/с → $d_{БВ}$ = 300 мм → $K_{БВ}$ = 1120,6 л/с;
$Q_{ВГ}$ = 18 л/с → $d_{ВГ}$ = 200 мм → $K_{ВГ}$ = 383,7 л/с.

Определим путевые потери (на трение) для каждого участка:

$h_{l_{АБ}} = (Q_{АБ} / K_{АБ})^2\, l_{АБ} = (76/1684{,}2)^2 \cdot 600 = 1{,}22$ м;

$h_{l_{БВ}} = (Q_{БВ} / K_{БВ})^2\, l_{БВ} = (46/1120{,}6)^2 \cdot 300 = 0{,}5$ м;

$h_{l_{ВГ}} = (Q_{ВГ} / K_{ВГ})^2\, l_{ВГ} = (18/383{,}7)^2 \cdot 250 = 0{,}55$ м.

Полные потери напора (общие) для каждого участка магистрали определим, считая, что местные потери составляют 5% от путевых потерь:

$h_{W_{АБ}} = 1{,}05\, h_{l_{АБ}} = 1{,}05 \cdot 1{,}22 = 1{,}28$ м;

$h_{W_{БВ}} = 1{,}05\, h_{l_{БВ}} = 1{,}05 \cdot 0{,}5 = 0{,}525$ м;

$h_{W_{ВГ}} = 1{,}05\, h_{l_{ВГ}} = 1{,}05 \cdot 0{,}55 = 0{,}58$ м.

Для определения требуемой высоты водонапорной башни составим уравнение Бернулли, пренебрегая скоростными напорами:

$$\frac{p_А}{\rho g} + z_А = \frac{p_Г}{\rho g} + z_Г + \sum h_{W_{АГ}},$$

где $z_А = z_Г$, так как по условию задачи трубопровод горизонтальный;

$$\frac{p_А}{\rho g} = H_б;\ \frac{p_Г}{\rho g} = h_{св}.$$

Тогда требуемая высота водонапорной башни равна

$H_б = h_{св} + \sum h_{W_{АГ}}$ = 12+1,28+0,525+0,58 = 14,385 м.

Принимаем высоту водонапорной башни $H_б$ = 15,0 м.

Для расчёта ответвлений необходимо определить пьезометрические высоты в пунктах магистрали:

$$\frac{p_А}{\rho g} = H_б = 15 \text{ м};$$

$$\frac{p_Б}{\rho g} = H_б - h_{W_{АБ}} = 15 - 1{,}28 = 13{,}72 \text{ м};$$

$$\frac{p_В}{\rho g} = H_б - h_{W_{АБ}} - h_{W_{БВ}} = 15 - 1{,}28 - 0{,}525 = 13{,}195 \text{ м};$$

$$\frac{p_Г}{\rho g} = H_б - h_{W_{АБ}} - h_{W_{БВ}} - h_{W_{ВГ}} = 15 - 1{,}28 - 0{,}525 - 0{,}58 = 12{,}605 \text{ м}.$$

Расчёт сложного ответвления *ВЕ*.

Определим допустимые общие потери напора в пункте *В*:

$$h_{W_В} = \frac{p_В}{\rho g} - h_{св} = 13{,}195 - 12 = 1{,}195 \text{ м}.$$

Допустимые потери напора по длине составят 95% от общей потери напора:

$h_{l_B} = 0{,}95 h_{W_B}$ = 0,95·1,195 = 1,13 м.

Определим средний гидравлический уклон:

$$I = \frac{h_{l_B}}{\sum l_{BE}} = \frac{1{,}13}{150+150} = 0{,}00378 .$$

Тогда требуемые расходные характеристики можно определить из формулы (3.38)

$$K_{T_{ВЖ}} = \frac{Q_{ВЖ}}{\sqrt{I}} = \frac{28}{\sqrt{0{,}00378}} = 455 \text{ л/с};$$

$$K_{T_{ЖЕ}} = \frac{Q_{ЖЕ}}{\sqrt{I}} = \frac{16}{\sqrt{0{,}00378}} = 260 \text{ л/с}.$$

По табл.15 устанавливаем диаметры стандартных трубопроводов, принимая значения расходных характеристик больше требуемых:

$K_{T_{ВЖ}} < K_{ВЖ}$ = 692,1 л/с → $d_{ВЖ}$ = 250 мм;

$K_{T_{ЖЕ}} < K_{ЖЕ}$ = 383,7 л/с → $d_{ЖЕ}$ = 200 мм.

Фактические потери напора на трение (путевые) для принятых диаметров труб определяем по формуле (3.41).

$$h_{l_{ВЖ}} = \frac{Q_{ВЖ}^2}{K_{ВЖ}^2} l_{ВЖ} = \frac{28^2}{692{,}1^2} 150 = 0{,}247 \text{ м};$$

$$h_{l_{ЖЕ}} = \frac{Q_{ЖЕ}^2}{K_{ЖЕ}^2} l_{ЖЕ} = \frac{16^2}{383{,}7^2} 150 = 0{,}263 \text{ м}.$$

Полные потери напора с учётом местных потерь:

$h_{W_{ВЖ}} = 1{,}05 h_{l_{ВЖ}} = 1{,}05 \cdot 0{,}247 = 0{,}26$ м;

$h_{W_{ЖЕ}} = 1{,}05 h_{l_{ЖЕ}} = 1{,}05 \cdot 0{,}263 = 0{,}276$ м.

Проверяем обеспеченность свободного напора в конечном пункте (тупике) E: определяем пьезометрические высоты.

$$\frac{p_Ж}{\rho g} = \frac{p_B}{\rho g} - h_{W_{ВЖ}} = 13{,}195 - 0{,}26 = 12{,}935 \text{ м};$$

$\frac{p_E}{\rho g} = \frac{p_Ж}{\rho g} - h_{W_{ЖЕ}} = 12{,}935 - 0{,}276 = 12{,}659$ м, что больше $h_{св}$ = 12 м.

Р а с ч ё т   п р о с т о г о   о т в е т в л е н и я *ЖЗ*.

Допустимые полные потери напора

$$h_{W_З} = \frac{p_Ж}{\rho g} - h_{св} = 12{,}935 - 12 = 0{,}935 \text{ м}.$$

Допустимые потери напора на трение

$h_{l_З} = 0{,}95 h_{W_З} = 0{,}95 \cdot 0{,}935 = 0{,}887$ м.

Гидравлический уклон

$$i = \frac{h_{l_З}}{l_{ЖЗ}} = \frac{0{,}887}{200} = 0{,}004435\,.$$

Требуемая расходная характеристика

$$K_{T_{ЖЗ}} = \frac{Q_{ЖЗ}}{\sqrt{i}} = \frac{12}{\sqrt{0{,}004435}} = 181\,\text{л/с}.$$

По табл. 17 устанавливаем диаметр стандартных труб и соответствующую расходную характеристику:

$d_{ЖЗ}$ = 200 мм, $K_{ЖЗ}$ = 383,7 л/с > 181 л/с.

Фактические потери напора по длине

$$h_{l_{ЖЗ}} = \frac{Q_{ЖЗ}^2}{K_{ЖЗ}^2} l_{ЖЗ} = \frac{12^2}{383{,}7^2} 200 = 0{,}197\,\text{м}.$$

Фактические полные потери напора

$$h_{W_{ЖЗ}} = 1{,}05 h_{l_{ЖЗ}} = 1{,}05 \cdot 0{,}197 = 0{,}207 \text{ м}.$$

Фактический свободный напор в конце ответвления (в тупике *З*)

$$\frac{p_З}{\rho g} = \frac{p_Ж}{\rho g} - h_{W_{ЖЗ}} = 12{,}935 - 0{,}207 = 12{,}728\,\text{м}, \text{ что больше } h_{св}.$$

Р а с ч ё т п р о с т о г о о т в е т в л е н и я *БД*.

Допустимые полные потери напора

$$h_{W_Д} = \frac{p_Б}{\rho g} - h_{св} = 13{,}72 - 12 = 1{,}72\,\text{м}.$$

Допустимые потери напора на трение

$$h_{l_Д} = 0{,}95 h_{W_Д} = 0{,}95 \cdot 1{,}72 = 1{,}64\,\text{м}.$$

Гидравлический уклон

$$i = \frac{h_{l_Д}}{l_{БД}} = \frac{1{,}64}{400} = 0{,}0041\,.$$

Требуемая расходная характеристика

$$K_{T_{БД}} = \frac{Q_{БД}}{\sqrt{i}} = \frac{30}{\sqrt{0{,}0041}} = 470\,\text{л/с}.$$

По табл. 17 устанавливаем диаметр стандартных труб и соответствующую расходную характеристику:

$d_{БД}$ = 250 мм, $K_{БД}$ = 692,1 л/с > 470 л/с.

Фактические потери напора по длине

$$h_{l_{БД}} = \frac{Q_{БД}^2}{K_{БД}^2} l_{ЖЗ} = \frac{30^2}{692{,}1^2} 400 = 0{,}752\,\text{м}.$$

Фактические полные потери напора

$$h_{W_{БД}} = 1{,}05 h_{l_{БД}} = 1{,}05 \cdot 0{,}752 = 0{,}79 \text{ м}.$$

Фактический свободный напор в конце ответвления (в тупике *Д*)

$$\frac{p_Д}{\rho g} = \frac{p_Б}{\rho g} - h_{W_{БД}} = 13{,}195 - 0{,}79 = 12{,}405 \text{ м}, \text{ что больше } h_{св}.$$

Пример 8. По сифону диаметром d = 100 мм (рис. 57), длина которого L = 20 м, вода в количестве Q = 10 л/с переливается из резервуара *А* в резервуар *Б*. Определить разность горизонтов воды в резервуарах *А* и *Б* и величину наибольшего вакуума в сифоне. Расстояние от уровня воды в резервуаре *А* до центра сечения x–x равно z = 3,0 м, а расстояние от начала сифона до сечения x–x равно l = 15,0 м. Коэффициент шероховатости старых стальных труб сифона n = 0,0125. Кинематическую вязкость воды принять ν = 0,0131 см^2/с.

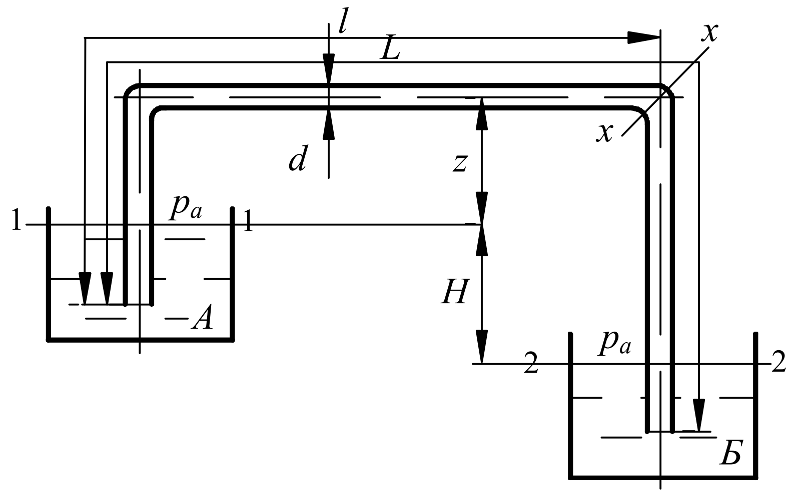


Рис. 57. К примеру 8

Решение. Определим скорость движения воды в сифоне по формуле (3.4)

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{3{,}14 \cdot 0{,}1^2} = 1{,}27 \text{ м/с}.$$

Для определения разности горизонтов H в резервуарах *А* и *Б* запишем уравнение Бернулли (3.9) для сечений 1–1 и 2–2, проведённых по свободной поверхности воды в резервуарах, относительно плоскости сравнения, проведённой через сечение 2–2:

$$\frac{\alpha V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + h_W .$$

Пренебрегаем скоростными напорами в обоих сечениях, как малыми величинами по сравнению со скоростным напором в трубе.

$p_1 = 0$; $p_2 = 0$; $z_1 = H$; $z_2 = 0$, тогда $H = h_W$.

Для определения путевых потерь напора необходимо узнать режим движения жидкости:

$Re = Vd/\nu = 127 \cdot 10/0{,}0131 = 97\ 000$.

По табл. 9 назначаем эквивалентную шероховатость : $\Delta = 1{,}2$ мм.

По табл. 8 принимаем формулу для определения коэффициента Дарси:

$500 \cdot d/\Delta = 500 \cdot 100/1{,}2 = 41\ 666 < Re$, следовательно, воспользуемся формулой Маннинга:

$\lambda = 124{,}6n^2/\sqrt[3]{d} = 0{,}0042$.

Для определения местных потерь напора примем значения коэффициентов местных сопротивлений по табл. 12:

-на вход $\zeta_{вх} = 0{,}5$;

- на плавный поворот на 90º $\zeta_{пов} = 0{,}15$;

-на выход $\zeta_{вых} = 1{,}0$.

Тогда общие потери напора определяем, используя формулы (3.18) и (3.20):

$h_W = (\zeta_{вх} + 2\ \zeta_{пов} + \zeta_{вых} + \lambda L/d)V^2/2g$.

$h_W = (0{,}5+2 \cdot 0{,}15+1{,}0+0{,}0042 \cdot 20/0{,}1)1{,}27^2/(2 \cdot 9{,}81) = 0{,}22$ м.

Тогда разность горизонтов воды в резервуарах *А* и *Б* равна

$H = 0{,}22$ м.

Наибольший вакуум в сифоне будет в наивысшей точке, наиболее удалённой от питающего резервуара. В нашем случае – в сечении *х-х*. Величину этого вакуума можно определить, используя уравнение Бернулли, которое после преобразования примет следующий вид:

$$h_{вак} = z + \left(1{,}1 + \lambda\frac{l}{d} + \zeta_{вх} + \zeta_{пов}\right)\frac{V^2}{2g} =$$

$$= 3 + \left(1{,}1 + 0{,}0042\frac{15}{0{,}1} + 0{,}5 + 0{,}15\right)\frac{1{,}27^2}{2 \cdot 9{,}81} =$$

$= 3{,}2$ м вод. ст.

Пример 9. Определить расход воды из круглого отверстия диаметром d = 10 см и установить, как он изменится, если к этому отверстию присоединить цилиндрический насадок длиной l = 0,4 м или конически расходящийся насадок с углом конусности θ = 6º (рис. 58). Напор над центром тяжести отверстия H = 3,0 м.

Решение. Расход воды, вытекающий через отверстие и насадки, определим по формуле (3.54)

$Q = \mu\omega\sqrt{2gH_0}$, в которой $H_0 = H = 3{,}0$ м.

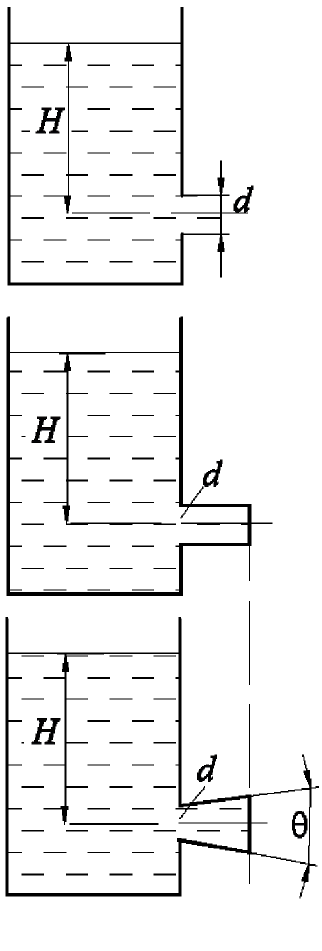


Рис. 58. К примеру 9

Коэффициент расхода для отверстия примем по табл. 18: $\mu_{отв} = 0{,}62$.

$$Q_{отв} = 0{,}62 \frac{3{,}14 \cdot 0{,}1^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 3{,}0} = 0{,}0373 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Прежде чем определять расход через цилиндрический насадок, необходимо выяснить условия работы насадка: будет ли насадок работать полным сечением. Для этого сравним длину насадка l и действующий напор H_0 с предельными значениями:

$l = 0{,}4$ м, что больше $3{,}5d = 0{,}35$ м;

$H_0 = 3{,}0$ м, что меньше допустимых 12,5 м.

Следовательно, насадок работает полным сечением, и коэффициент расхода $\mu_{цил} = 0{,}82$ (см. табл. 20).

$$Q_{цил} = 0{,}82 \frac{3{,}14 \cdot 0{,}1^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 3{,}0} = 0{,}0494 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для конически расходящегося насадка определим диаметр его выходного отверстия D:

$D = d + 2\, l\, \mathrm{tg}\theta^{o} = 0{,}1 + 2 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}0525 = 0{,}142$ м.

Коэффициент расхода для этого насадка, работающего полным сечением, определим по табл. 20: $\mu_{к.р} = 0{,}5$.

$$Q_{к.р} = 0{,}5 \frac{3{,}14 \cdot 0{,}142^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 3{,}0} = 0{,}0607 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Следовательно, при присоединении к отверстию насадка расход возрастает.

Определим скорости истечения воды из отверстия, цилиндрического и конически расходящегося насадков по формуле (3.63), учитывая, что на поверхности резервуара давление атмосферное ($p_0 = p_a$):

$$V = \varphi \sqrt{2gH_0}\,.$$

Коэффициенты скорости φ примем по табл. 20.

$$V_{отв} = 0.97\sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 3{,}0} = 7{,}44 \text{ м/с}.$$

$$V_{ц.н} = 0{,}82\sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 3{,}0} = 6{,}29 \text{ м/с}.$$

$$V_{к.р} = 0{,}5\sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 3{,}0} = 3{,}84 \text{ м/с}.$$

Следовательно, при присоединении к отверстию насадка скорость истечения убывает. Наибольший расход при наименьшей скорости протекания жидкости будет, когда к отверстию присоединяется конически расходящийся насадок.

3.3. Задачи

3.3.1. Трубопровод состоит из трёх последовательно соединённых участков труб, внутренние диаметры которых $d_1 = 52$ мм, $d_2 = 76$ мм, $d_3 = 82$ мм.

Определить средние скорости жидкости на участках, если объёмный расход в трубопроводе Q = 48 л/мин.

Ответ: 0,38 м/с; 0,18 м/с;0,15 м/с.

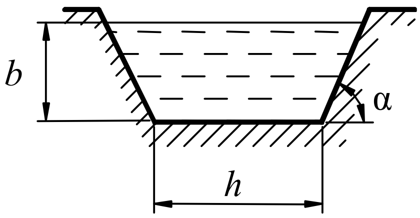


Рис. 59. К задаче 3.3.2

3.3.2. Вычислить гидравлический радиус потока воды в открытом канале трапецеидального сечения с размерами: b = 3,0 м, h = 1,0 м, α = 45° (рис. 59).

Ответ: 0,69 м.

3.3.3. Для потока жидкости в трубе квадратного сечения с размерами 1,0 × 1,0 м вычислить значения гидравлического радиуса при заполнении трубы жидкостью до высоты h = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 м. Построить график изменения гидравлического радиуса R в зависимости от высоты уровня h жидкости в трубе.

3.3.4. По трубопроводу диаметром d = 100 мм перекачивается нефть с расходом Q = 12,0 дм^3/с. Определить режим движения жидкости и критическую скорость при температуре t = 10 °С.

Ответ: режим турбулентный; 0,98 м/с.

3.3.5. Определить давление жидкости в сечении 2–2 при удельном весе γ = 9000 Н/м^3. Известно, что в сечении 1–1 скорость равна V_1= 1 м/с, давление p_1 = 3,0 ат. Площадь в сечении 1–1 в 3 раза больше площади в сечении 2–2. Жидкость считать идеальной.

Ответ: $2 \cdot 10^5$ Па.

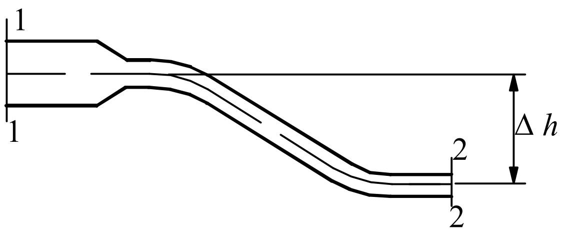


Рис. 60. К задаче 3.3.6

3.3.6. Определить среднюю скорость движения воды (рис. 60) в сечении 2–2, если в сечении 1–1 скорость V_1 = 1,2 м/с, давление p_1 = 1,2 ат. Давление в сечении 2–2 p_2 = 1,1 ат. Центр тяжести сечения 2–2 находится ниже центра тяжести сечения 1–1 на величину Δh = 3,0 м. Потери давления на преодоление гидравлических сопротивлений равны h_W= 1,4 м.

Ответ: 4,25 м/с.

3.3.7. Вычислить давление в сечении 1–1 трубопровода, по которому движется жидкость плотностью ρ = 880 кг/м^3 (см. рис.60). Известно, что скорость жидкости в сечении 1–1 трубопровода равна V_1 = 1,1 м/с, площадь в сечении 1–1 в 2,5 раза больше площади в сечении 2–2. Разность геометрических высот центров тяжести сечений принять равной Δh = 8,7 м. Жидкость считать идеальной.

Ответ: 97 200 Па.

3.3.8. Определить потери напора при подаче воды через трубку диаметром d = 2 см и длиной l = 20,0 м со скоростью V = 12 см/с при температуре t = 16 °С.

Ответ: 2,2 см.

3.3.9. Для потока жидкости прямоугольного сечения с площадью живого сечения ω = 1,2 м^2 найти такие размеры потока b и h, чтобы гидравлический радиус был наименьшим.

Ответ: 1,548 м; 0,774 м.

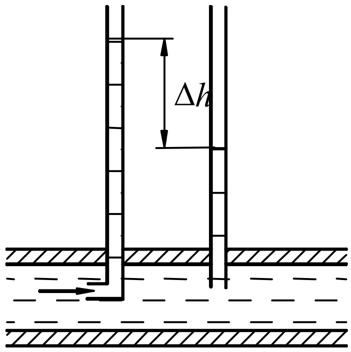


Рис. 61. К задаче 3.3.10

3.3.10. Для измерения скоростных напоров применяется гидрометрическая трубка (рис. 61), состоящая из пьезометра и трубки Пито. Определить местную скорость движения жидкости в трубопроводе, если разность показаний в трубке Пито и пьезометре равна Δh = 620 мм. Жидкость считать идеальной.

Ответ: 3,46 м/с.

3.3.11. В сужающуюся трубу подаётся вода расходом Q = 0,065 л/с при температуре t =10 °С. Определить режим движения в широкой и узкой части, если d_1 = 40 мм и d_2 = 20 мм.

Ответ: в широкой части режим ламинарный; в узкой части режим турбулентный.

3.3.12. Горизонтальный трубопровод составлен из трёх участков различных диаметров (рис. 62): d_1 = 24 мм, d_2 = 56 мм, d_3 = 40 мм. Высота уровней в пьезометрических трубках I и II при движении жидкости по трубопроводу устанавли-

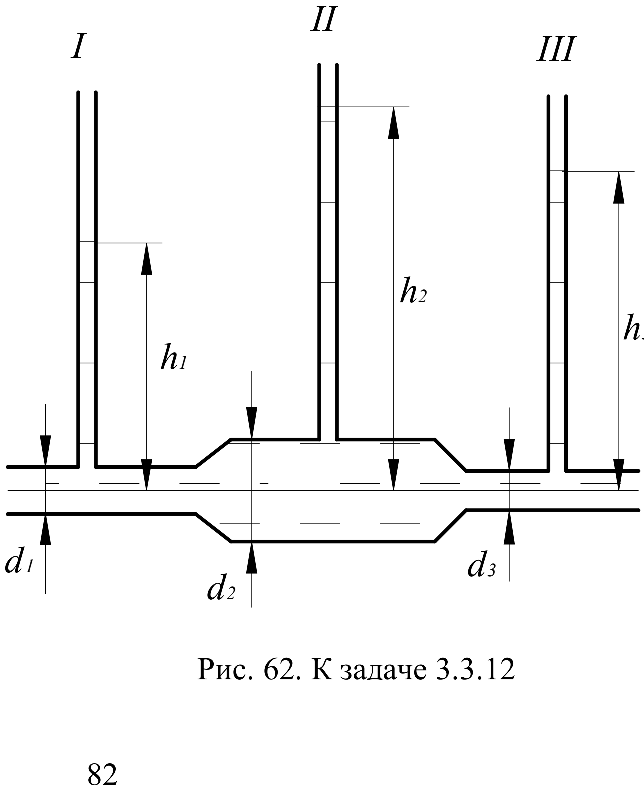


Рис. 62. К задаче 3.3.12

вается соответственно: h_1 = 68 см и h_2 = 84 см. Вычислить пьезометрическую высоту h_3, установившуюся в пьезометре III. Жидкость считать идеальной.

Ответ: 82 см.

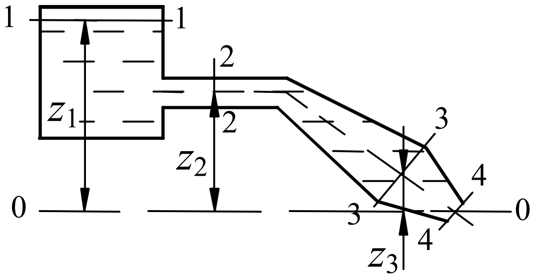


Рис. 63. К задаче 3.3.13

3.3.13. Из резервуара вытекает вода по трубопроводу переменного сечения с площадями ω_1 = 5,0 м^2, ω_2 = 0,015 м^2, ω_3 = 0,04 м^2, ω_4 = 0,02 м^2 (рис. 63). Расстояния от плоскости сравнения до центра тяжести сечений соответственно: z_1 = 4,0 м, z_2 = 2,0 м, z_3 = 0,5 м, z_4 = 0. Абсолютное давление на поверхности жидкости в резервуаре p_A = 110 кПа. Определить расход воды, скорость и избыточное давление жидкости (в метрах водяного столба) в сечениях. Построить напорную и пьезометрическую линии. Движение по трубопроводу считать установившимся. Потерями напора пренебречь.

Ответ: 177,2 л/с; 0 м/с; 11,8 м/с; 4,43 м/с; 8,86 м/с; 0 м; -5,1 м; 2,5 м; 0 м.

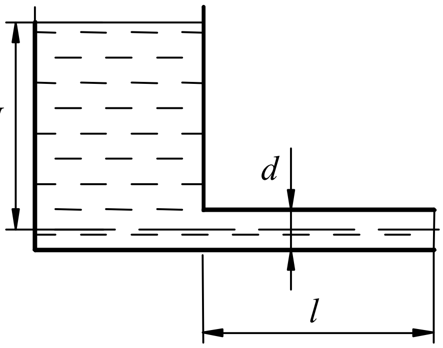


Рис. 64. К задаче 3.3.14

3.3.14 Из открытого резервуара с постоянным расходом Q = 1,0 л/с и скоростью V = 0,5 м/с подаётся нефть (рис.64) Определить диаметр d и напор H, необходимый для пропуска нефти по трубопроводу длиной L = 100 м. Кинематическую вязкость нефти принять равной ν = 0,14 см^2/с. Построить напорную и пьезометрическую линии.

Ответ: d = 5 см; H = 0,92 м.

3.3.15. Вычислить потерю напора в трубопроводе внутренним диаметром d = 50 мм, длиной L = 100 м при перекачке нефти с кинематической вязкостью ν = 0,2 Ст и скоростью движения V = 0,3 м/с.

Ответ: 0,77 м

3.3.16. Нефть с кинематической вязкостью ν = 0,3 см^2/с движется по трубопроводу. Определить минимальный диаметр трубопровода d, при котором нефть будет двигаться при ламинарном режиме с расходом Q = 8,14 л/с.

Ответ: 150 мм.

3.3.17. Определить расход воды в горизонтальном трубопроводе переменного сечения, скорость на каждом из участков и построить пьезометрическую линию, если $H = 5{,}0$ м, $d_1 = 120$ мм, $d_2 = d_4 = 60$ мм, $d_3 = 100$ мм (рис. 65).

Ответ: 0,049 м^3/с; 4,38 м/с; 17,7 м/с; 6,3 м/с; 17,7 м/с.

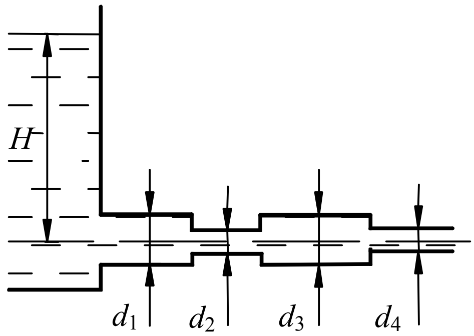


Рис. 65. К задаче 3.3.17

3.3.18. Определить путевые потери в водопроводе диаметром $d = 80$ мм и длиной $L = 250$ м, если расход воды составляет $Q = 8{,}0$ л/с и температура воды $t = 12$ °С. Эквивалентную шероховатость принять равной $\Delta = 0{,}25$ мм.

Ответ: 10,87 м.

3.3.19. Из открытого бака с постоянным напором $H = 11{,}0$ м по чугунному трубопроводу длиной $L = 3{,}5$ м и диаметром $d = 80$ мм вода вытекает в атмосферу (см. рис. 64). Определить скорость и расход, пренебрегая местными потерями. Коэффициент гидравлического трения принять равным $\lambda = 0{,}02$.

Ответ: $V = 5{,}69$ м/с; $Q = 0{,}029$ м^3/с.

3.3.20. Нефть с кинематической вязкостью $\nu = 0{,}3$ см^2/с движется по трубопроводу. Найти:

а) минимальный диаметр трубопровода, при котором нефть будет двигаться при ламинарном режиме с расходом $Q = 8{,}14$ л/с;

б) с каким расходом нефть будет двигаться по трубопроводу с диаметром $d = 150$ мм при числе Рейнольдса $Re = 5000$.

Ответ: а) $d = 150$ мм; б) $Q = 17{,}5$ л/с.

3.3.21. По нефтепроводу диаметром $d = 200$ мм и длиной $l = 4{,}0$ км перекачивается нефть с расходом $Q = 108$ м^3/ч, кинематической вязкостью $\nu = 1$ Ст, удельным весом $\gamma = 8829$ Н/м^3. Определить необходимое давление в начале нефтепровода:

а) при горизонтальной местности;

б) если местность имеет уклон в сторону движения нефти $i_0 = 0{,}001$.

Ответ: а) 2,75 кгс/см^2; 2,35 кгс/см^2.

3.3.22. Определить потерю напора в нефтепроводе диаметром 200 мм и длиной 50 км при перекачке нефти вязкостью 3,5 Ст. Абсолютную шероховатость труб принять равной 0,12 мм. Расход нефти равен 42 л/с.

Ответ: 489 м.

3.3.23. Определить потерю напора на трение по длине водопровода диаметром d = 100 мм и длиной L = 2,5 км, если расход воды составляет 118 л/с.

Ответ: 46,7 м.

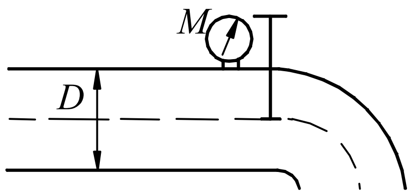


Рис. 66. К задаче 3.3.24

3.3.24. При закрытом кране манометр показывает давление p_1 = 4,0 ат. После открытия крана манометр стал показывать давление p_2 =1,5 ат (рис. 66). Определить расход, если диаметр трубы D = 100 мм.

Ответ: 0,172 м^3/с.

3.3.25. По трубопроводу диаметром d = 150 мм перекачивается нефть, кинематическая вязкость которой $\nu = 2{,}8\cdot10^{-6}$ м^2/с. Приняв режим движения нефти при расходе Q = 44 дм^3/с ламинарным, определить гидравлический уклон потока.

Ответ: 0,00101.

3.3.26. По стальному трубопроводу длиной 250 м и диаметром 100 мм перекачивается нефть со скоростью 2,1 м/с. Динамическая вязкость нефти μ = 3,3 сП (сантипуаз), плотность нефти ρ = 890 кг/м^3. Определить гидравлический уклон. Построить напорную линию.

Ответ: 0,255.

3.3.27. Определить расход при подаче разжиженного битума по трубопроводу при условии сохранения ламинарного режима движения, если диаметр d = 100 мм, кинематическая вязкость битума ν = 0,02 Ст.

Ответ: 356,2 см^3/с.

3.3.28. По трубопроводу диаметром d = 80 мм и длиной l =1000 м подаётся разогретый битум вязкостью ν = 0,8 Ст. Определить потери напора в трубопроводе, если расход Q = 8 л/с.

Ответ: 6,47 м.

3.3.29. По трубопроводу постоянного диаметра и длиной L = 56,4 км перекачивается нефть плотностью ρ = 860 кг/м^3. Начальная точка выше конечной точки на 120 м. Определить гидравлический уклон, если известно, что давление в начальной точке $p_1 = 3{,}0\cdot10^6$ Па, а в конечной точке $p_2 = p_a$.

Ответ: 0,00275.

3.3.30. Из водоёма с минимальной высотой уровня H = 2,0 м вода отводится по трубе диаметром d = 100 мм (рис. 67) с расходом Q = 20 дм^3/с. На пути движения воды имеются местные сопротивления: вход в трубу, два резких поворота на 90°, одна полностью открытая задвижка. Длина участка трубы l = 210,0 м. Определить высоту h, на которую нужно поднять резервуар, чтобы обеспечить пропуск данного расхода. Построить пьезометрическую и напорную линии.

Ответ: 13,5 м.

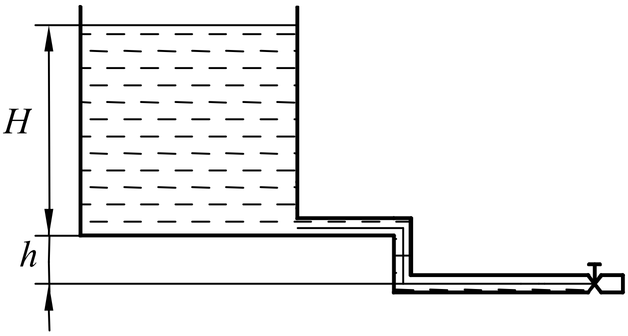


Рис. 67. К задаче 3.3.30

3.3.31. По трубчатому расходомеру протекает вода (рис. 68) с расходом Q = 9,0 л/с. Диаметр суженной части трубопровода составляет d = 50 мм. Определить:

а) разность показаний пьезометров h, если диаметр основного трубопровода D = 75 мм;

б) диаметр основного трубопровода D, если разность показаний пьезометров h = 1,03 м.

Ответ: а) 0,84 м; б) 100 мм.

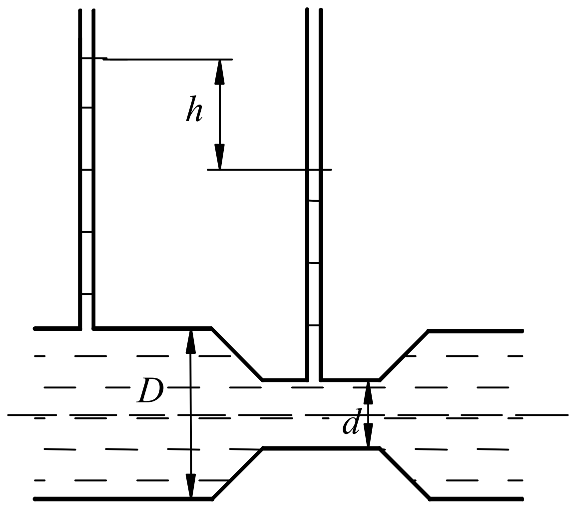


Рис. 68. К задаче 3.3.31

3.3.32. По трубопроводу постоянного сечения длиной l = 5800 м перекачивается нефть плотностью ρ = 890 кг/м^3. Начальная точка трубопровода находится ниже конечной точки на 42,0 м. Гидравлический уклон равен I = 0,006. Определить необходимое давление p_1 в начальной точке трубопровода, для получения избыточного давления в конечной точке p_2 = 2 ат.

Ответ: 9,85 ат.

3.3.33. Определить диаметр трубы и необходимый напор для обеспечения пропуска расхода нефти Q = 1,0 л/с при скорости движения V = 0,5 м/с. Построить пьезометрическую и напорную линии. Кинематическая вязкость нефти ν = 1,4 Ст. Длина трубы l = 100 м.

Ответ: 50 мм; 9,5 м.

3.3.34. Определить напор центробежного насоса, зная расход Q = 100 л/с, коэффициент полезного действия насоса η = 0,65 и мощность на валу насоса N = 60 кВт.

Ответ: 29,3 м.

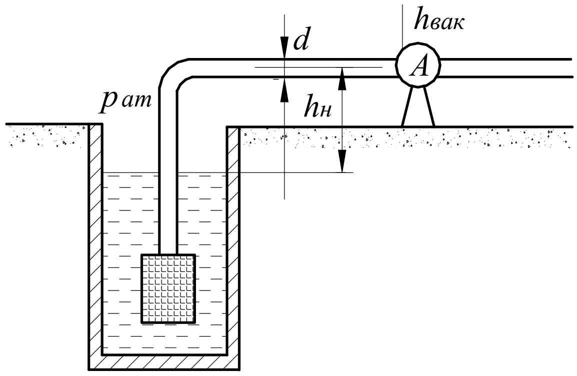


Рис. 69. К задаче 3.3.35

3.3.35. Определить диаметр всасывающей трубы и вакуум у центробежного насоса, если известно, что расход Q = 17,7 л/с, расстояние от свободной поверхности в резервуаре до оси насоса $h_н$ = 6,0 м, длина всасывающей трубы $l_{вс}$ = 60,0 м, допустимая скорость в трубе V = 1,0 м/с (рис. 69). При входе во всасывающую трубу устроена сетка и обратный клапан.

Ответ:150 мм; 7,07 м вод. ст.

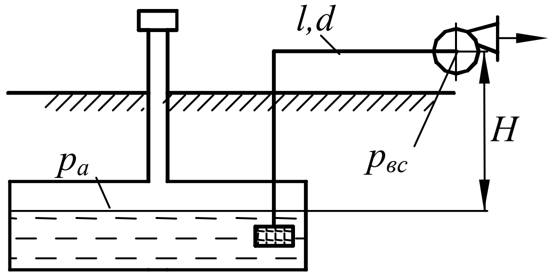


Рис. 70. К задаче 3.3.36

3.3.36. Насос откачивает бензин из подземного резервуара по всасывающему трубопроводу (рис. 70), диаметр которого d = 100 мм, длина l = 120,0 м, эквивалентная шероховатость Δ = 0,1 мм. Уровень бензина в резервуаре ниже оси насоса на H = 3,8 м. Давление на поверхности бензина в резервуаре атмосферное. Определить расход бензина из резервуара, если известно, что абсолютное давление всасывания насоса $p_{вс}$ = 42 кПа. Плотность бензина принять ρ = 750 кг/м^3 и кинематическую вязкость ν = 0,01 Ст. Местные потери напора в трубопроводе считать равными 10% от путевых потерь.

Ответ: 0,0135 м^3/с.

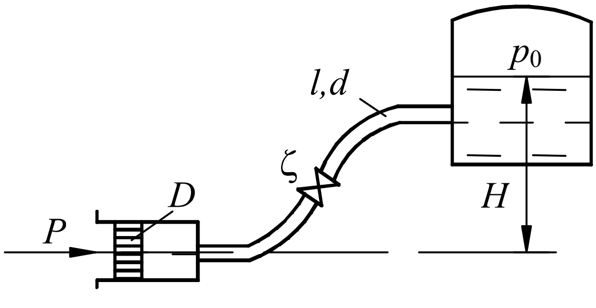


Рис. 71. К задаче 3.3.37

3.3.37. Определить силу P, которую нужно приложить к поршню насоса диаметром D = 65 мм, чтобы подавать в напорный бак жидкость с постоянным расходом Q = 2,5 л/с (рис. 71). Высота подъёма жидкости в установке H = 10,0 м. Избыточное давление в напорном баке p_0 = 0,15 МПа; длина трубопровода l = 60,0 м, диаметр d = 30 мм, его шероховатость Δ = 0,03 мм. Коэффициент сопротивления вентиля на трубопроводе ζ = 5,5. Потери напора на плавных поворотах трубопровода не учитывать. Трением поршня в цилиндре пренебречь. Задачу решить для случаев подачи в бак бензина (ρ = 765 кг/м^3, ν = 0,4 сСт) и машинного масла (ρ = 930 кг/м^3, ν = 20 сСт).

Ответ: 1500 Н; 2350 Н.

3.3.38. Керосин перекачивается насосом по резиновому шлангу длиной 160 м, диаметром 62 мм. Производительность насоса Q = 250 л/мин. Вычислить развиваемое насосом давление, если выкидной конец шланга открыт в атмосферу и поднят на 16,0 м выше нагнетательного патрубка насоса. Перекачиваемый керосин имеет вязкость ν = 0,024 Ст и плотность ρ = 800 кг/м^3.

У к а з а н и е. Коэффициент Дарси для резиновых шлангов вычисляют по формуле

$\lambda = 0{,}0113 + 0{,}9170\, Re^{-0{,}41}$.

Ответ: 1,76 ат.

3.3.39. Насос забирает из водоёма воду с температурой 20 ºС в количестве Q = 50 л/с. Определить максимальную высоту расположения горизонтального вала насоса над свободной поверхностью воды, если давление перед насосом $p_2 = 0{,}3\cdot10^5$ Па. На всасывающей чугунной трубе диаметром d = 0,25 м и длиной l = 50,0 м имеется заборная сетка, плавный поворот радиусом R = 0,5 м и регулирующая задвижка, открытая на 45% площади проходного сечения.

Ответ: 6,2 м.

3.3.40. С помощью насоса, установленного в пункте A, в бак B подаётся нефть плотностью ρ = 905 кг/м^3 (рис. 72). Высота всасывающей линии h = 4,0 м, высота нагнетательной линии H = 46,0 м. Давление в колодце и резервуаре атмосферное. Расход нефти равен Q = 12 м^3/ч. Потери напора на преодоление гидравлических сопротивлений составляют 4,5 м. Определить мощность, потребляемую насосом, если коэффициент полезного действия насоса равен 75%.

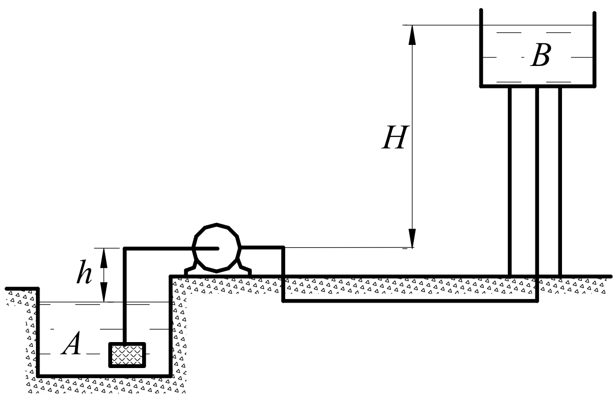


Рис. 72. К задаче 3.3.40

Ответ: 2,14 кВт.

3.3.41. Вода из скважины по сифонному трубопроводу подаётся в сборный колодец. Длина трубы сифона 350 м, её диаметр 100 мм. Разность уровней воды в скважине и в колодце 2,2 м. Превышение наивысшей точки сифона над уровнем воды в скважине h = 2,8 м. Приняв коэффициент гидравлического трения λ = 0,025 и сумму коэффициентов местных сопротивлений $\sum\zeta = 6{,}5$, определить среднюю скорость движения воды и расход в сифонной трубке, а также вакуум в наивысшей точке сифона. Длина восходящей ветки 80,0 м.

Ответ: 0,68 м/с; 0,00535 м^3/с; 3,3 м.

3.3.42. По сифонному трубопроводу из скважины в сборный коллектор должна подаваться вода в количестве 5 л/с. Длина трубопровода 120 м, диаметр 76 мм, превышение наивысшей точки сифона над уровнем воды в скважине 3,1 м. Определить необходимый напор сифона, приняв сумму коэффициентов местных сопротивлений $\sum\zeta = 7$.

Ответ: 2,32 м.

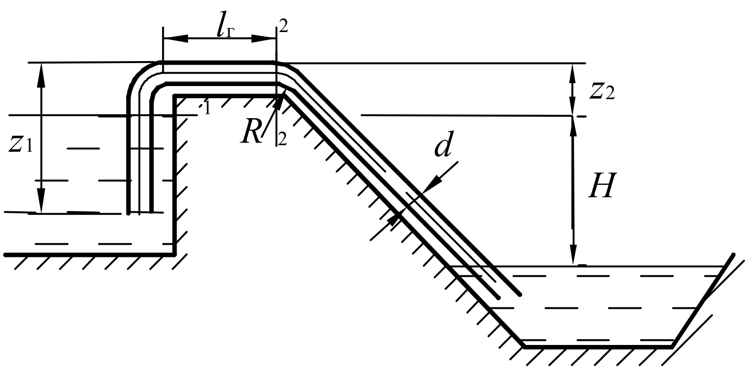


Рис. 73. К задаче 3.3.43

3.3.43. Сифонный бетонный водосброс диаметром d = 1,0 м, общей длиной L = 50,0 м сбрасывает воду из водохранилища в реку, уровень которой на H = 5,0 м ниже уровня водохранилища (рис. 73). Определить подачу сифонного водосброса Q, если он имеет два поворота: $\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$ с радиусами закругления R = 2,0 м. Длина горизонтального участка $l_г$ = 2,0 м. Температура воды в водохранилище 0 ºС. Определить также вакуум в верхней точке сифона, если z_1 = 3,0 м и z_2 = 1,0 м.

Ответ: 4,6 м^3/с; 41 кПа.

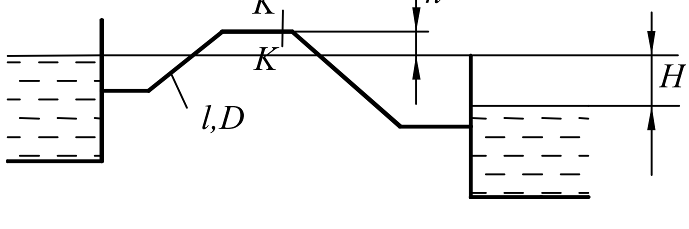


Рис. 74. К задаче 3.3.44

3.3.44. По самотечному сифонному трубопроводу длиной l = 44,0 м необходимо обеспечить расход нефти (ρ = 0,9 г/см^3, ν = 1,0 Ст) Q = 1,0 л/с при напоре P = 2,0 м (рис. 74). Найти требуемый диаметр D трубопровода, учитывая только потери напора на трение по его длине. Определить допустимое превышение h сечения K-K над уровнем в верхнем резервуаре, если это сечение находится на середине длины трубопровода, а вакуум не должен превышать $p_{вак}$ = 53 кПа.

Ответ: 55 мм; 5,0 м.

3.3.45. По сифону, изображённому на рис.75, перекачивается вода. Определить допустимую температуру воды для работы сифона без срыва потока при следующих данных: длина трубы 150 м, длина восходящей ветви сифона 24 м, превышение точки C над уровнем воды в верхнем резервуаре h = 4,0 м, H = 25,0 м. Скоростным напором можно пренебречь.

Ответ: 56 °C.

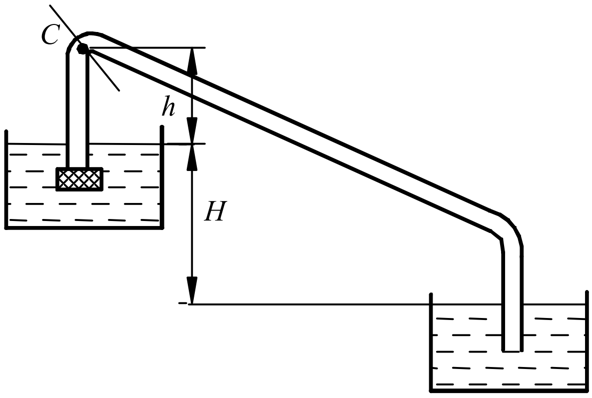


Рис. 75. К задаче 3.3.45

3.3.46. Определить требуемый напор в точке A для пропуска 25 л/с воды по замкнутому трубопроводу, изображённому на рис. 76, при следующих данных: напор в точке $Б$ $H_Б$ = 15,0 м, диаметры участков d_1 =150 мм, d_2 = 100 мм, l_1 = 1000 м, l_2 = 600 м, l_3 = 800 м.

Ответ: 15,104 м.

3.3.47. Подобрать диаметры труб для участков замкнутой сети при следующих данных: длины участков l_1 = 600 м, l_2 = 500 м, l_3 = 700 м; расходы на участках Q_1 = 12 л/с, Q_2 = 10 л/с, Q_3 = 14 л/с; напор в точках A и $Б$ равен H_A = 15,0 м и $H_Б$ = 3,0 м (рис. 76).

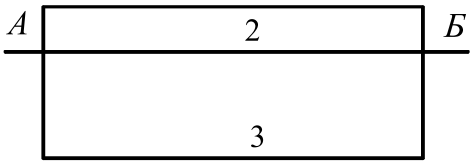


Рис. 76. К задаче 3.3.46

3.3.48. Определить расходы в ветвях сети (см. рис. 75) при следующих данных: диаметры участков d_1 = 100 мм, d_2 = 150 мм, d_3 = 76 мм, длины участков l_1 = 1200 м, l_2 = 900 м, l_3 = 1600 м. Напор в точке A 40 м, напор в точке $Б$ 5,0 м. Суммарная производительность сети 35 л/с.

3.3.49. Определить напор, необходимый для пропуска расхода воды Q = 0,07 м^3/с через трубопровод диаметром d = 0,3 м и длиной l = 1200 м. Трубы стальные новые.

Ответ: 3,7 м.

3.3.50. Определить приблизительный расход в стальном самотечном водопроводе диаметром d = 82 мм и длиной l = 820 м, если H = 12,9 м.

Ответ: 0,005 м^3/с.

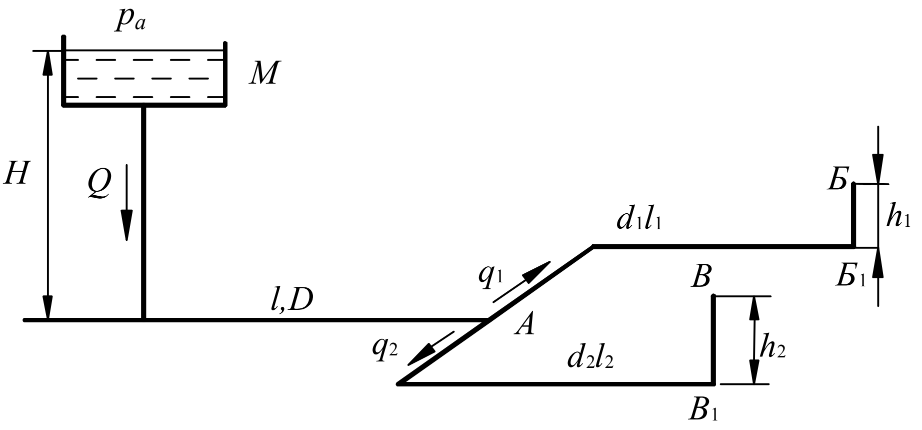


Рис. 77. К задаче 3.3.51

3.3.51. Из резервуара M по трубе длиной L = 1000 м в узел A (рис. 77) поступает вода в количестве Q = 12 л/с. В узле A трубопровод разветвляется, и расход q_1 = 4,0 л/с пропускается по трубе длиной l_1 = 75 м, а расход q_2 = 8,0 л/с – по трубе длиной l_2 = 100 м. Трубопроводы $АБ_1$ и $АВ_1$ расположены в горизонтальной плоскости, а точки $Б$ и $В$ подняты от этой плоскости соответственно на h_1 = 8,0 м и h_2 = 4,0 м. Из труб l_1 и l_2 вода вытекает в атмосферу. Вся сеть смонтирована из стальных цельнотянутых труб, и предполагается, что в процессе эксплуатации эти трубы можно будет отнести к разряду нормально загрязнённых (n = 0,0125). Определить диаметры труб на всех участках водопроводной сети и напор, необходимый для обеспечения пропуска заданных расходов.

Ответ: 150 мм; 65 мм; 100 мм; 19,4 м.

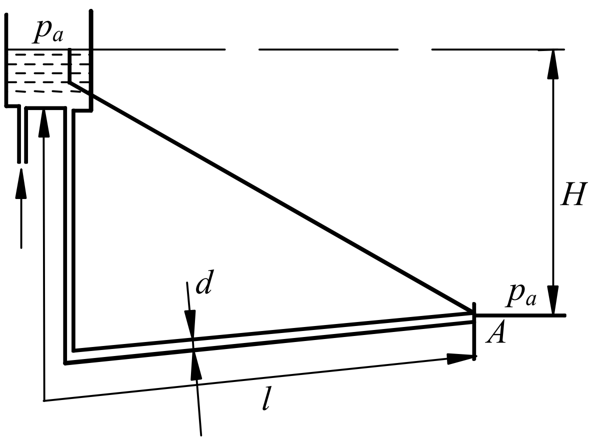


Рис. 78. К задаче 3.3.52

3.3.52. Определить высоту водонапорной башни H над пунктом A, к которому вода подаётся по чугунным трубам, бывшим в употреблении, с расходом Q = 18 л/с. Длина водопровода l = 2000 м (рис. 78). В водонапорную башню вода подаётся насосом.

Ответ: 13,4 м.

3.3.53. От водонапорной башни A проложен трубопровод из последовательно соединённых стальных новых труб разного диаметра. Вода из этого трубопровода в количестве Q = 5 л/с вытекает в атмосферу. В сечениях 1, 2, 3 и 4 отводятся соответствующие расходы: q_1 = 4 л/с, q_2 = 3 л/с, q_3 =6 л/с и q_4 = 2 л/с. Отдельные участки трубопровода имеют следующие длины: l_1 = 1000 м, l_2 = 750 м, l_3 =1500 м, l_4 = 1000 м, l_5 = 1250 м. Определить высоту водонапорной башни и диаметры труб на участках трубопровода (рис. 79).

Ответ:37,4 м; 200 мм; 175 мм; 150 мм; 125 мм; 100 мм.

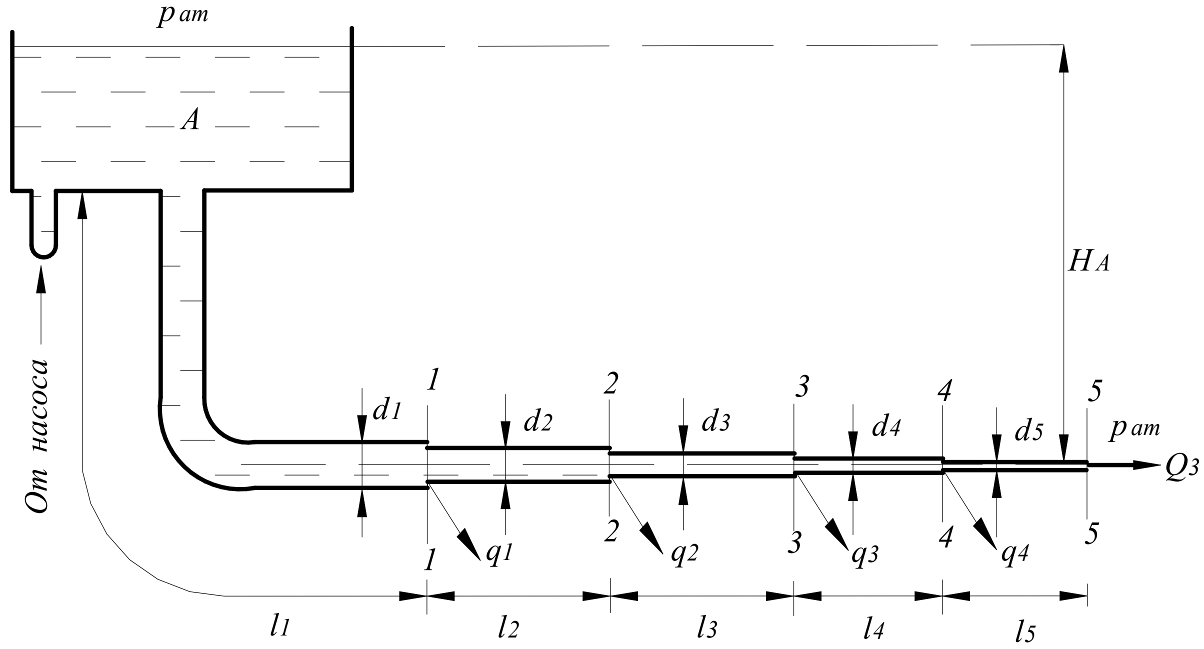


Рис. 79. К задаче 3.3.53

3.3.54. Определить разность горизонтов в резервуарах A и $Б$ при расходе воды по трубопроводу, соединяющему эти резервуары, Q = 12·10^{-3} м^3/с. Длина трубопровода l = 400 м, диаметр d = 1000 мм (рис. 80). Коэффициент шероховатости следует принять n = 0,0125. Коэффициент Дарси определить с учётом области сопротивления. Местные по-

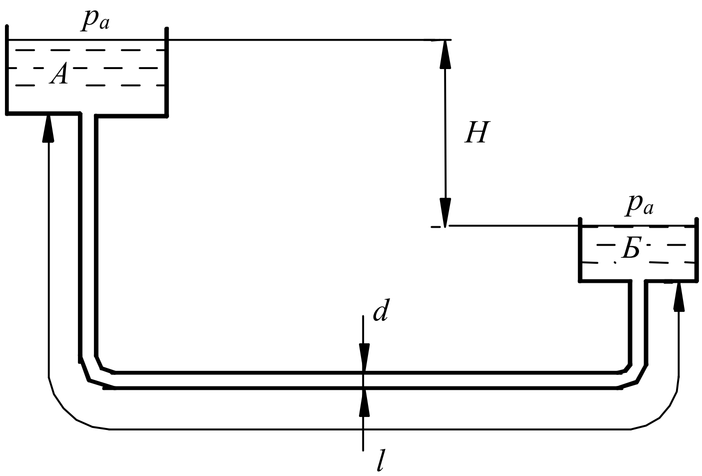


Рис. 80. К задаче 3.3.54

тери составляют 10% потери напора по длине.

Ответ: 22 м.

3.3.55. Определить, какое количество воды вытекло из цилиндрического вертикального резервуара диаметром D = 1,2 м за время t = 1 мин через отверстие в дне диаметром d = 100 мм. Уровень воды в баке поддерживается постоянным при напоре H = 1,3 м. Сжатие струи считать полным совершенным.

Ответ: 1,48 м^3.

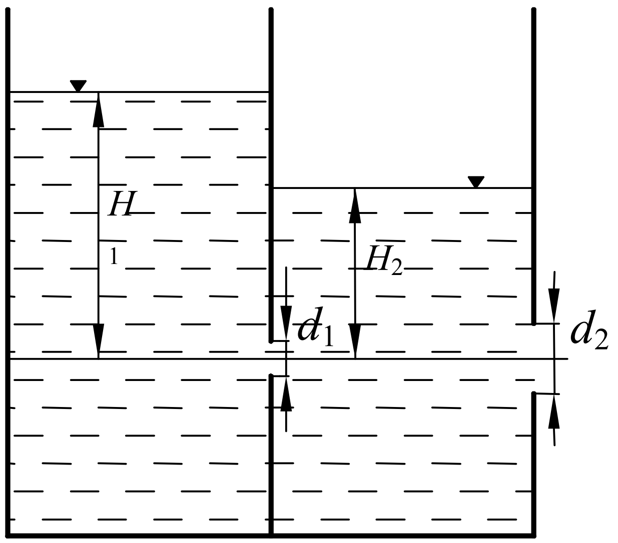


Рис. 81. К задаче 3.3.56

3.3.56. Призматический резервуар разделён на две части перегородкой (рис. 81). В левом отсеке поддерживается постоянный уровень воды. В перегородке имеется круглое отверстие диаметром d = 80 мм, расположенное на глубине H_1 = 3,2 м под поверхностью воды. Во внешней стенке резервуара на одной высоте с первым отверстием расположено второе отверстие диаметром d_2 = 100 мм Определить расход воды и уровень воды H_2 в правом отсеке при установившихся уровнях в отсеках.

Ответ 0,0208 м^3/с; 0,92 м.

3.3.57. Цилиндрический резервуар диаметром D = 4,0 м и высотой H = 6,0 м имеет у дна отверстие диаметром d = 100 мм. Определить время полного опорожнения резервуара, если коэффициент расхода отверстия μ = 0,62.

Ответ: 47 мин 34 с.

3.3.58. Определить расход жидкости через цилиндрический насадок, имеющий диаметр d = 100 мм и длину l = 400 мм, если напор над центром насадка H = 3,4 м.

Ответ: 52,5 л/с.

3.3.59. Вода вытекает через отверстие диаметром d = 25 мм в тонкой стенке вертикального цилиндрического резервуара, открытого сверху. Вычислить, за какой промежуток времени уровень воды в резервуаре снизится с 12,0 м до 4,5 м, считая от центра отверстия. Коэффициент расхода принять равным $\mu = 0,65$, а диаметр бака $D = 5,0$ м.

Ответ: 5 ч. 10 мин.

3.3.60. В дне резервуара имеются два отверстия диаметром $d = 100$ мм. Напор поддерживается постоянным $H = 2,0$ м. Как изменится расход, если к одному из отверстий присоединить цилиндрический насадок?

Ответ: увеличится на 9700 см^3/с.

3.3.61. С целью определения коэффициента расхода насадка, установленного в плоском днище вертикального цилиндрического открытого резервуара, наблюдали за понижением уровня воды в резервуаре. За 24 мин высота уровня понизилась от 2,6 м до 1,2 м. Диаметр резервуара $D = 1,4$ м, диаметр насадка $d = 20$ мм. Определить коэффициент расхода.

Ответ: 0,62.

3.3.62. Через круглое незатопленное отверстие в тонкой стенке диаметром $d = 40$ мм вытекает вода. Каким должен быть напор воды над центром отверстия, чтобы её расход был равен $Q = 2,6$ л/с?

Ответ: 3,76 м.

3.3.63. Определить расход воды через гидромонитор (конический насадок), выходное отверстие которого равно $d = 40$ мм, если манометр показывает давление 4 ат.

Ответ: 0,0288 м^3/с.

3.3.64. В резервуаре находится 1,1 м воды и 6,2 м нефти плотностью $\rho = 900$ кг/м^3. Диаметр резервуара $D = 6,0$ м. Определить время слива воды через короткий патрубок диаметром $d = 100$ мм.

Ответ: 430 с.

3.3.65. Определить расход воды через квадратное затопленное отверстие со стороной $a = 150$ мм, если глубина погружения центра отверстия под свободную поверхность с напорной стороны $H_1 = 4,4$ м, а с низовой стороны $H_2 = 2,2$ м. Скоростью подхода воды пренебречь.

Ответ: 0,0916 м^3/с.

Заключение

Гидравлика – это наука, имеющая тысячелетнюю историю развития. Диапазон гидравлических явлений, встречающихся в дорожном строительстве и в используемом техническом оборудовании, весьма велик. Поэтому знание законов равновесия и движения жидкостей необходимо для их грамотного применения в широкой практической деятельности инженера.

Материалы учебного пособия обобщают опыт, накопленный на кафедре «Проектирование дорог» Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ) при организации учебного процесса по подготовке дипломированных специалистов. Настоящий сборник задач представляет собой одно из первых профессионально ориентированных учебных изданий, подготовленных по дисциплине «Гидравлика» под требования ГОС ВПО 2-го поколения для специальностей направления подготовки *270200 (653600) – Транспортное строительство*.

В настоящее пособие не вошли некоторые специальные вопросы, заслуживающие особого рассмотрения: гидравлический удар, гидротранспорт, движение жидкости в открытых руслах. Эти темы будут рассмотрены при подготовке следующих учебных пособий.

Автор заранее выражает благодарность и признательность коллегам, которые пришлют свои отзывы и пожелания, с целью улучшения содержания данного учебного пособия. Адрес: 644080, г. Омск-80, пр. Мира, 5, СибАДИ, кафедра «Проектирование дорог».

Библиографический список

1. *Альтшуль А. Д., Калицун В. И., Майрановский Ф. Г., Пальгунов П. П.* Примеры расчётов по гидравлике: Учебное пособие для вузов. –М.: Стройиздат, 1976. –255 с.

2. *Гиргидов А. Д.* Механика жидкости и газа (гидравлика): Учебник для вузов. – СПб.: СПбГПУ, 2002. –545 с.

3. *Горчин Н. К., Чертоусов М. Д.* Гидравлика в задачах.–Л.: КУБУЧ, 1927. –675 с.

4. *Киселёв П. Г. и др.* Справочник по гидравлическим расчётам. –М.: Энергия, 1972. –312 с.

5. *Константинов Н. М., Петров Н. А., Высоцкий Л. И.* Гидравлика, гидрология, гидрометрия: Учебник для вузов: В 2 ч. –М.: Высшая школа, 1987. Ч. 1.–304 с.

6. *Константинов Н. М., Петров Н. А., Высоцкий Л. И.* Гидравлика, гидрология, гидрометрия: Учебник для вузов: В 2 ч.–М.: Высшая школа, 1987. Ч. 2. – 431 с.

7. Примеры гидравлических расчётов: Учебное пособие для вузов / Под ред. Н. М. Константинова.–М.: Транспорт, 1977. –290 с.

8. *Соколов А. В.* Сборник задач по гидравлике. –М.: Гостоптехиздат, 1956. –88 с.

9. Справочник по гидравлическим расчётам/ Под ред. П. Г. Киселёва. –М.: Энергия, 1977. –312 с.

10. *Чугаев Р. Р.* Гидравлика: Учебник для вузов. –Л.: Энергоиздат, 1982. –670 с.