

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Учебное пособие

Тверь 2019

УДК 556.556(075.8)

ББК 30.123я7

Рецензенты: генеральный директор ООО «Тверьагроводпроект» Гулевкина Л.Н.; кандидат технических наук доцент кафедры ТвГТУ «Гидравлика, теплотехника и гидропривод» Кузнецов Б.Ф.

Скоробогатов, М.А. Решения типовых гидравлических задач: учебное пособие / М.А. Скоробогатов, Е.Н. Коноплев, Ф.В. Качановский, Н.П. Курбатов, С.С. Посадкова, А.А. Андрианова. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2019. 224 с.

Содержит краткие теоретические сведения и основные расчетные зависимости по дисциплине «Гидравлика», детально выполненные примеры решения различных по тематике и сложности задач, охватывающие основные разделы гидравлики. Приведены задачи для самостоятельного решения. Материал проиллюстрирован расчетными схемами и чертежами. Снабжено справочными данными, помещенными в приложения.

Подготовлено на кафедре «Гидравлика, теплотехника и гидропривод» Тверского государственного технического университета.

Предназначено для студентов очного и заочного обучения по направлениям: 08.03.01 Строительство профилей ПГС, АДА, ПСК, ГСХ, ПЗ; 15.03.02 Технологические машины и оборудование ТМСЮ; 23.03.02 Наземные транспортно-технологические комплексы (профиль НТТК); 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника (профиль АЭС) при изучении курсов «Гидравлика», «Гидрогазодинамика», «Гидромеханика», «Механика жидкости», «Гидравлика и гидропривод», а также для студентов факультета ФДПО в ТвГТУ.

ISBN 978-5-7995-1038-1

© Тверской государственный
технический университет, 2019
© Скоробогатов М.А.,
Коноплев Е.Н., Качановский Ф.В.,
Курбатов Н.П., Посадкова С.С.,
Андрианова А.А., 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
I. ГИДРОСТАТИКА.....	6
1. Гидростатическое давление.....	6
1.1. Основные теоретические положения и расчетные зависимости.....	6
1.2. Примеры решения задач.....	9
1.3. Задачи для самостоятельного решения.....	15
2. СИЛА ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ.....	22
2.1. Основные теоретические положения и расчетные зависимости.....	22
2.2. Примеры решения задач.....	25
2.3. Задачи для самостоятельного решения.....	34
3. СИЛА ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА КРИВОЛИНЕЙНЫЕ СИММЕТРИЧНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОСТОЯННОЙ КРИВИЗНЫ.....	47
3.1. Основные теоретические положения и расчетные зависимости.....	47
3.2. Примеры решения задач.....	50
3.3. Задачи для самостоятельного решения.....	64
II. ГИДРОДИНАМИКА.....	90
4. Уравнение Д. Бернулли и гидравлические сопротивления....	90
4.1. Основные теоретические положения и расчетные зависимости.....	90

4.2. Примеры решения задач на применение уравнения Д. Бернулли без учета гидравлических сопротивлений.....	97
4.3. Примеры решения задач на применение уравнения Д. Бернулли с учетом гидравлических сопротивлений.....	104
4.4. Задачи для самостоятельного решения.....	114
5. Гидравлический расчет коротких трубопроводов.....	137
5.1. Основные типы задач и общие рекомендации по их решению.....	137
5.2. Примеры решения задач.....	139
5.3. Задачи для самостоятельного решения.....	161
6. Гидравлический расчет длинных трубопроводов.....	184
6.1. Основные расчетные зависимости и типы задач.....	184
6.2. Примеры решения задач.....	189
6.3. Задачи для самостоятельного решения.....	195
7. Гидравлический расчет открытых каналов при равномерном движении жидкости.....	200
7.1. Основные расчетные зависимости и типы задач.....	201
7.2. Примеры решения задач.....	205
7.3. Задачи для самостоятельного решения.....	209
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	213
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	222

ВВЕДЕНИЕ

Государственные образовательные стандарты России среди требований, предъявляемых к организации и содержанию учебного процесса в вузах, предусматривают увеличение доли самостоятельной работы студентов и повышение ее эффективности в связи с необходимостью снижения недельной нагрузки аудиторными занятиями.

Одним из путей активизации самостоятельной работы студентов и повышения ее эффективности является создание и внедрение в учебный процесс пособий, позволяющих уменьшить трудоемкость самостоятельной работы при выполнении курсовых и расчетно-графических работ. Поэтому пособие призвано не только облегчить студентам выполнение этих работ, но и способствовать более глубокому усвоению теоретического материала курса и выработке умений и практических навыков в гидравлических расчетах.

Основное назначение – оказать помощь студентам в гидравлических расчетах отдельных элементов и фрагментов систем подачи и распределения жидкости при выполнении курсовых и расчетно-графических работ. Содержит решения задач по определению гидростатического давления, сил давления жидкости на плоские и криволинейные поверхности, а также по гидравлическому расчету коротких и длинных трубопроводов.

Решения большинства задач сопровождаются методическими рекомендациями, позволяющими облегчить применение расчетных зависимостей.

Пособие состоит из двух основных глав – гидростатики и гидродинамики. В каждой главе подразделы, в которых приведен теоретический материал, задачи с решением и задачи для самостоятельной работы.

В прилож. 1–11 дан справочный материал, необходимый для гидравлических расчетов, а также указания и рекомендации по составлению и оформлению курсовых и расчетно-графических работ с учетом требований ГОСТов.

I. ГИДРОСТАТИКА

1. ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ

1.1. Основные теоретические положения и расчетные зависимости

Гидростатическим давлением p называют напряжение сжатия, возникающее в каждой точке жидкости, находящейся в равновесии под действием поверхностных и массовых сил, определяемое выражением

$$p = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta\omega}, \quad (1.1)$$

где ΔP – элементарная равнодействующая поверхностных и массовых сил, действующая на элементарную площадку $\Delta\omega$.

Гидростатическое давление направлено по внутренней нормали к площадке действия ω , его величина не зависит от ориентации площадки в пространстве и является функцией координат точек жидкости, т. е. $p = f(x, y, z)$.

В СИ за единицу гидростатического давления принят паскаль (Па). Он обозначает, что давление, создаваемое силой 1 Н, равномерно распределенной по площади 1 м² (1 Па = 1 Н/м²).

Когда на жидкость, находящуюся в равновесии, действует только сила тяжести (рис. 1.1.1), изменение гидростатического давления p по глубине h описывается основным уравнением гидростатики:

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (1.2)$$

где p – давление в произвольно взятой точке A на глубине h под уровнем свободной поверхности жидкости; ρgh – весовое давление жидкости, т. е. гидростатическое давление, создаваемое весом столба h жидкости.

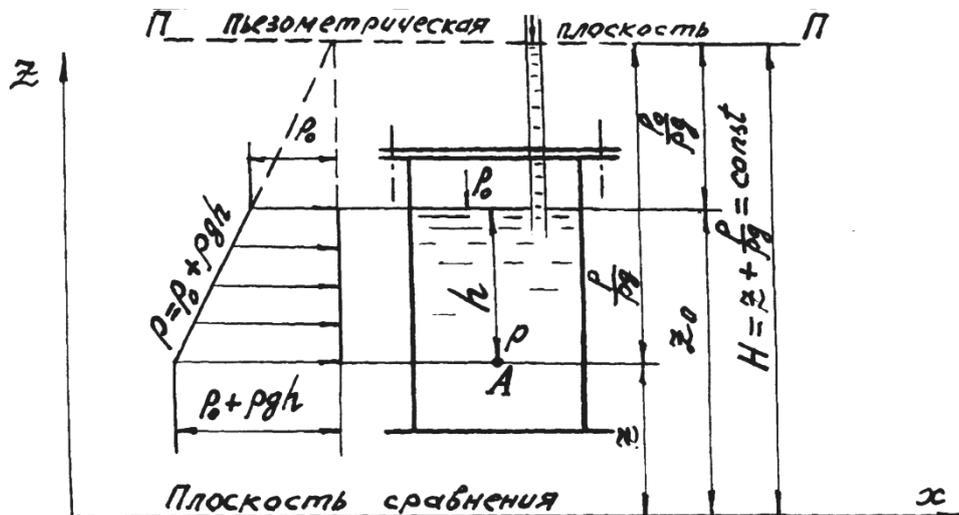


Рис. 1.1.1. К основному уравнению гидростатики

Из уравнения (1.1) видно, что при $p_0 = const$ и $\rho g = const$ давление p по глубине h изменяется по линейному закону. Вычислив по уравнению (1.2) давление p для двух произвольно взятых точек, расположенных на разной глубине h , можно построить диаграмму (эпюру) распределения гидростатического давления по глубине.

Из уравнения (1.2) следует, что внешнее давление p_0 передается всем точкам жидкости (см. рис. 1.1.1) без изменения. Это следствие называют законом Паскаля.

Наконец, уравнение (1.2) показывает, что в точках жидкости, расположенных на одинаковой глубине h , гидростатическое давление одинаково. Поверхность, во всех точках которой гидростатическое давление одинаково, называют поверхностью равного давления (поверхностью уровня). Следовательно, для однородной жидкости, находящейся в покое под действием только силы тяжести, любая горизонтальная плоскость, принадлежащая этой жидкости, является поверхностью равного давления.

Если резервуар открыт, внешнее давление p_0 равно атмосферному $p_{ат}$, и уравнение (1.2) принимает вид

$$p_{абс} = p_{ат} + \rho gh = p_{ат} + p_{изб}, \quad (1.3)$$

где $p_{абс}$ – абсолютное гидростатическое давление; $p_{изб}$ – избыточное гидростатическое давление, т. е. превышение абсолютного давления над атмосферным.

Из формулы (1.3) следует, что

$$p_{изб} = p_{абс} - p_{ат}. \quad (1.4)$$

При решении задач удобно оперировать именно избыточным гидростатическим давлением, т. е. давлением, отсчитываемым от условного нуля, за который принято давление атмосферного воздуха $p_{ат}$ на поверхности земли ($p_{ат} = 98100$ Па).

Из формулы (1.4) видно, что в зависимости от соотношения между $p_{абс}$ и $p_{ат}$ избыточное давление $p_{изб}$ может быть и положительной, и отрицательной величиной. Положительное избыточное гидростатическое давление называют манометрическим ($p_{ман}$), а отрицательное – вакуумметрическим ($p_{вак}$):

$$p_{вак} = -p_{изб} = p_{ат} - p_{абс}. \quad (1.5)$$

Из уравнения (1.5) следует, что величина вакуумметрического давления не может быть больше величины атмосферного давления (если $p_{абс} = 0$, $p_{вак} = p_{ат}$).

Существуют закрытые резервуары, где в произвольно взятых точках A жидкости давление манометрическое $p_{ман}$ (рис. 1.1.2) и вакуумметрическое $p_{вак}$ (рис. 1.1.3). Стеклянные открытые в атмосферу трубки, подключенные к точкам A , называют пьезометром и вакуумметром соответственно, а высоты, отсчитываемые от точек их подключения до уровней жидкости в них, – пьезометрической ($h_{пизб} = p_{изб} / \rho g$) и вакуум-

метрической ($h_{рвак} = p_{вак} / \rho g$). Эти высоты служат линейной мерой избыточного гидростатического давления (положительного и отрицательного), поэтому трубки называют жидкостным манометром (рис. 1.1.2) и жидкостным вакуумметром (рис. 1.1.3).

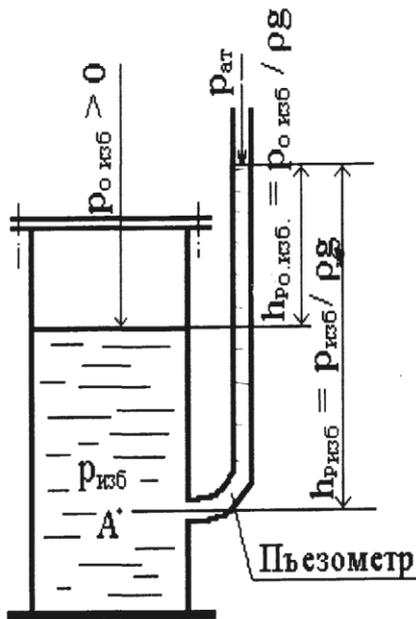


Рис. 1.1.2. К измерению манометрического давления жидкостным манометром

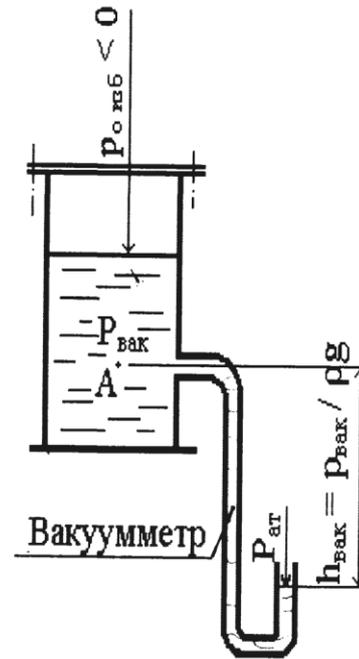


Рис. 1.1.3. К измерению вакуумметрического давления жидкостным вакуумметром

Основное уравнение гидростатики (см. формулу (1.2)) с учетом того, что $h = z_0 - z$ (см. рис. 1.1.1), после деления на ρg принимает вид

$$z + \frac{p}{\rho g} = z_0 + \frac{p_0}{\rho g} = H = const, \quad (1.6)$$

где z и z_0 – геометрические высоты, т. е. превышения рассматриваемых точек жидкости над произвольно выбираемой горизонтальной плоскостью, называемой плоскостью сравнения (см. рис. 1.1.1); $p / \rho g$ и $p_0 / \rho g$ – пьезометрические высоты, отвечающие гидростатическим давлениям p и p_0 ; H – гидростатический напор.

Из формулы (1.6) следует, что гидростатический напор для любой точки рассматриваемого объема однородной жидкости – величина постоянная.

Если мысленно соединить уровни жидкости в пьезометрах, подключенных к различным точкам жидкости, находящейся в равновесии под действием только силы тяжести (см. рис. 1.1.1), получим горизонтальную плоскость, называемую плоскостью гидростатического напора (пьезометрической плоскостью) П-П.

1.2. Примеры решения задач

Задача 1.2.1. В герметично закрытом резервуаре (рис. 1.2.1) вода плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ находится в абсолютном покое под действием силы тяжести. Глубина воды $h = 2,0 \text{ м}$. Пружинный манометр M , подключенный в точке D дна резервуара, показывает, что $p_{изб} = 800 \text{ кПа}$.

Определить внешнее избыточное давление $p_{0изб}$, построить эпюру избыточного гидростатического давления по глубине h и вычислить гидростатический напор $H_{изб}$, отвечающий избыточному давлению.

Решение. В данной задаче целесообразно оперировать избыточным гидростатическим давлением, поскольку известно манометрическое давление в одной из точек жидкости.

1. Определяем внешнее избыточное давление $p_{0изб}$ из основного уравнения гидростатики (см. уравнение (1.2)). Решая уравнение (1.2) относительно p_0 , получим: $p_{0изб} = p_{изб} - \rho gh = p_{Дизб} - \rho gh = 8000 - 1000 \cdot 9,81 = -9658 \text{ Па} = -9,66 \text{ кПа}$. Знак «минус» у $p_{0изб}$ показывает, что внешнее давление в нашем случае является вакуумметрическим. Это означает, что на свободной поверхности воды абсолютное давление меньше атмосферного на 9658 Па .

2. Строим эпюру избыточного гидростатического давления на боковую стенку резервуара.

Из уравнения (1.2) видно, что давление p по глубине h распределяется по линейному закону. Следовательно, для построения эпюры достаточно знать давление в двух точках жидкости, заглубленных на различную величину под уровень (в нашем случае давление $p_{0изб} = -9,66 \text{ кПа}$ на свободной поверхности воды и $p_{Дизб} = 8,00 \text{ кПа}$ на глубине $h = 1,80 \text{ м}$).

Для построения эпюры выбираем из ГОСТ 2.302-68 масштабы: для глубины – 1:20, а для давления в 1 см – 2 кПа.

Эпюру строим следующим образом. Откладываем в выбранных масштабах глубину h и перпендикулярно ей величины $p_{0изб}$ и $p_{Дизб}$ (первое свойство гидростатического давления), причем $p_{Дизб} = 8,00 \text{ кПа}$ в сторону жидкости, а $p_{0изб} = -9,66 \text{ кПа}$ – в противоположную. Соединив прямой линией концы отрезков, выражающих $p_{Дизб}$ и $p_{0изб}$, получаем эпюру избыточного гидростатического давления на боковую вертикальную стенку резервуара (рис. 1.2.2).

3. Определяем гидростатический напор $H_{изб}$, отвечающий избыточному гидростатическому давлению, воспользовавшись основным уравнением гидростатики, записанным в виде (1.6). Поскольку гидростатический напор – величина, постоянная для любой точки рассматриваемого объема однородной жидкости, мы вправе для вычисления $H_{изб}$ выбрать любую из точек жидкости, в которых известно гидростатическое давление.

За плоскость сравнения принимаем горизонтальное дно резервуара. Величину $H_{изб}$ вычислим для точки D в жидкости на дне резервуара:

$$H_{изб} = z_D + p_{Дизб} / \rho g = 0,00 + 8000 / 9,81 = 0,82 \text{ м (рис. 1.2.2).}$$

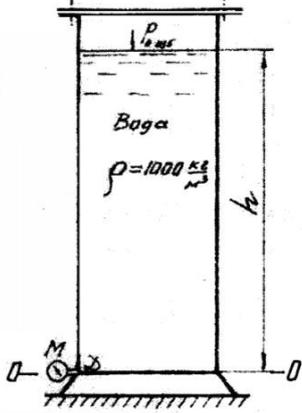


Рис. 1.2.1. Расчетная схема



Рис. 1.2.2. Эпюра избыточного гидростатического давления

Задача 1.2.2. Определить величину избыточного гидростатического давления в центре A сферического сосуда (рис. 1.2.3), находящегося в абсолютном покое и заполненного жидкостью, имеющей плотность $\rho = 720 \text{ кг/м}^3$. Пружинный манометр M , подключенный к точке A , показывает, что $p_{изб} = 58,0 \text{ кПа}$. Превышение оси вращения стрелки манометра над точкой подключения $h = 2,6 \text{ м}$.

Вычислить гидростатический напор $H_{изб}$ и построить эпюру избыточного гидростатического давления по глубине h .

Решение. Поскольку пружинный манометр M показывает давление на уровне оси вращения его стрелки, избыточное гидростатическое давление в центре A резервуара сложится из давления, показываемого манометром M , и давления, создаваемого весом столба h жидкости. Величину этого давления вычислим по формуле (1.2), в которую вместо p_0 подставляем показание манометра $p_{изб}$:

$$p_{Аизб} = p_{изб} + \rho gh = 58000 + 720 \cdot 9,81 \cdot 2,6 = 58000 + 18\,364 = 76364 \text{ Па} = 76,364 \text{ кПа.}$$

Гидростатический напор $H_{изб}$, отвечающий избыточному гидростатическому давлению, вычислим по формуле (1.6) для точки A , приняв за плоскость сравнения горизонтальную плоскость, проходящую через эту точку (рис. 1.2.3):

$$H_{изб} = z_A + \frac{p_{изб}}{\rho g}.$$

Поскольку плоскость сравнения проходит через точку A , $z_A = 0$, то

$$H_{изб} = 0 + \frac{76364}{720 \cdot 9,81} = \frac{76364}{7063} = 10,81 \text{ м.}$$

Зная избыточное гидростатическое давление в точке A резервуара и в точке, выше ее на величину h , можем построить эпюру избыточного гидростатического давления по глубине h . С этой целью принимаем масштабы: для глубины h – 1:50, а для давления в 1 см – 20 кПа.

Далее, отложив на чертеже перпендикулярно глубине h отрезки, выражающие давление в точке A и на высоте h от нее, и соединив концы отрезков прямой, получим искомую эпюру (рис. 1.2.4). На рис. 1.2.4 для наглядности показаны величина $H_{изб}$ и пьезометрическая плоскость П-П.

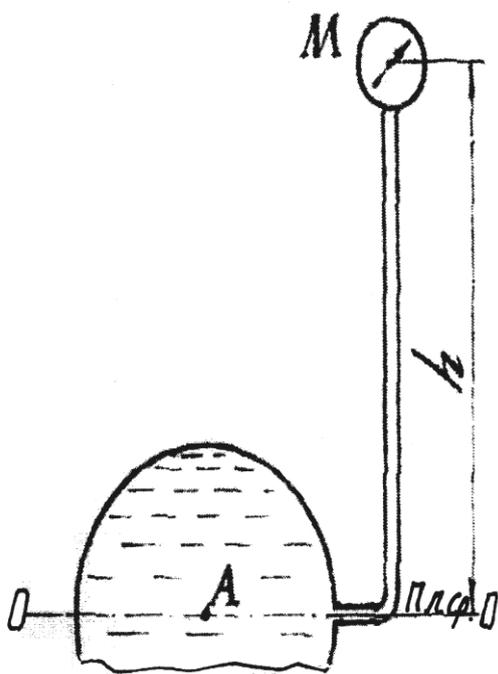


Рис. 1.2.3. Схема к задаче 1.2.2

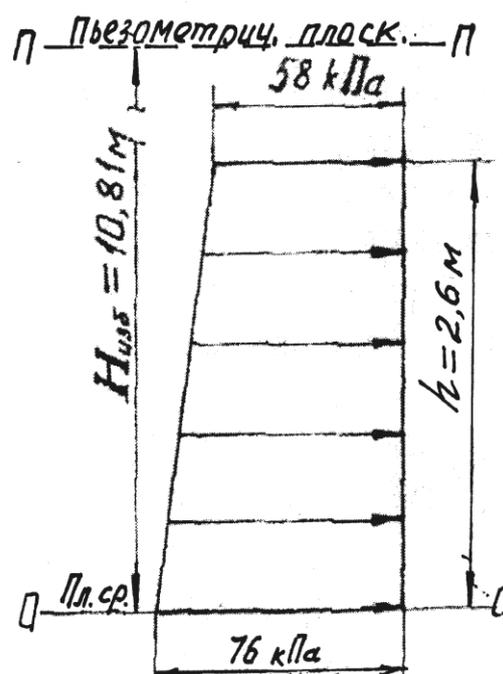


Рис. 1.2.4. Эпюра избыточного гидростатического давления

Задача 1.2.3. Определить разность гидростатических давлений ($p_A - p_B$) в точках A и B , расположенных на одном уровне в двух резервуарах, заполненных водой и соединенных дифференциальным ртутным манометром (рис. 1.2.5). Разность уровней ртути в коленях манометра $h = 0,15$ м. До ртути трубки дифференциального манометра заполнены водой с температурой $t = 20$ °С ($\rho_{в20} = 998$ кг/м³; $\rho_{рт20} = 13546$ кг/м³).

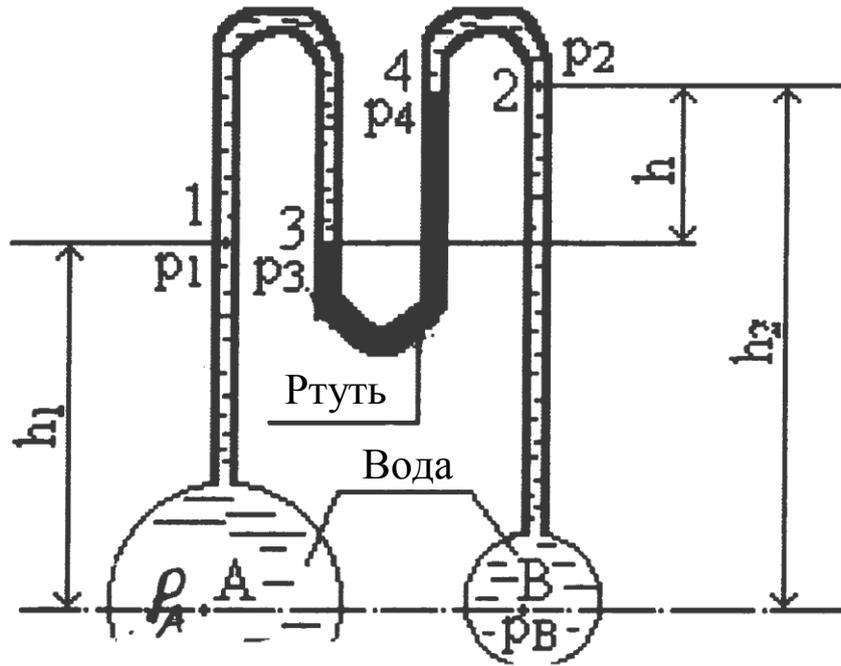


Рис. 1.2.5. Схема к задаче 1.2.3

Решение. Жидкость в системе находится в равновесии под действием силы тяжести. В этом случае любая горизонтальная плоскость, принадлежащая рассматриваемой жидкости, является поверхностью равного давления. На этом основании для условий данной задачи гидростатическое давление в точке 1 равно давлению в точке 3, а давление в точке 2 – давлению в точке 4 (см. рис. 1.2.5), т. е. $p_1 = p_3$; $p_2 = p_4$. Давление в точках А и В в соответствии с основным уравнением гидростатики (см. формулу (1.2)) можно выразить зависимостями:

$$p_A = p_1 + \rho_в g h_1; p_B = p_2 + \rho_в g h_2,$$

следовательно:

$$p_A - p_B = p_1 - p_2 - \rho_в g (h_2 - h_1), \text{ или } p_A - p_B = p_1 - p_2 - \rho_в g h,$$

где давление $p_1 = p_2 + \rho_{рт} g h$ согласно формуле (1.2).

Подставив эту зависимость в выражение для $(p_A - p_B)$, получим:

$$\begin{aligned} p_A - p_B &= (\rho_{рт} - \rho_в) g h = (13546 - 998) \cdot 9,81 \cdot 0,15 = \\ &= 12548 \cdot 1,48 = 18577 \text{ Па} = 18,58 \text{ кПа}. \end{aligned}$$

Задача 1.2.4. К герметично закрытому резервуару, частично заполненному водой ($\rho_в = 1000 \text{ кг/м}^3$), подсоединен двухжидкостный батарейный манометр (рис. 1.2.6), свободный конец которого сообщается с атмосферой. Части 1–2 и 3–4 манометра заполнены ртутью ($\rho_{рт} = 13600 \text{ кг/м}^3$), а части 2–3 и 4–5 – водой.

Определить давление p_0 , которое будет показывать пружинный манометр М, подключенный к крышке резервуара, если $h_1 = 1,0 \text{ м}$; $h_2 = 0,8 \text{ м}$; $h_3 = 1,2 \text{ м}$; $h_4 = 0,9 \text{ м}$; $H = 3,0 \text{ м}$ (рис. 1.2.6). Вычислить пьезометрическую высоту, отвечающую давлению $p_{0изб}$.

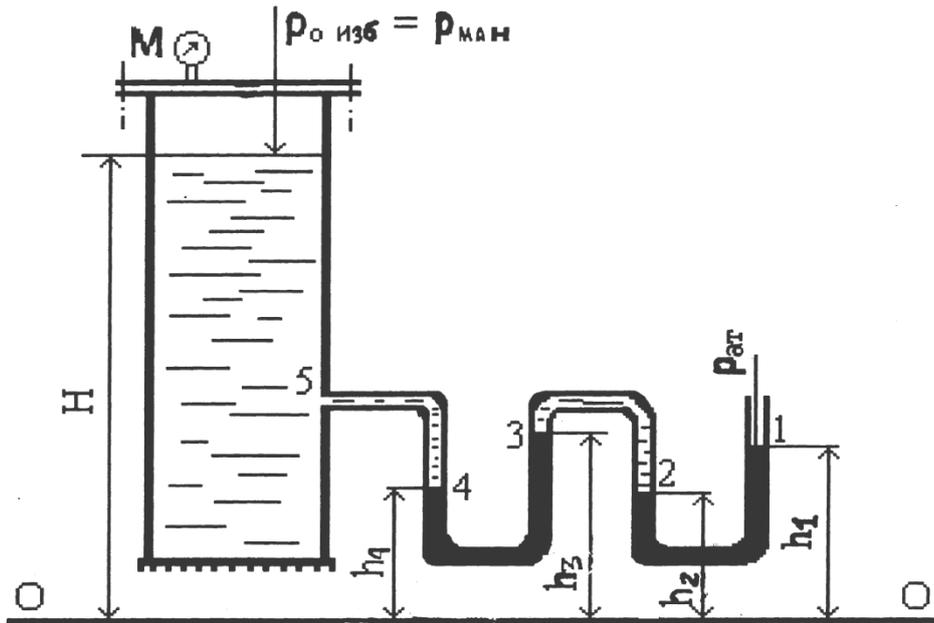


Рис. 1.2.6. Двухжидкостный батарейный манометр

Решение. Батарейный манометр представляет собой фактически два последовательно соединенных жидкостных манометра (см. задачу 1.2.3).

Искомое избыточное гидростатическое давление $p_{0изб}$ в соответствии с основным уравнением гидростатики (см. формулу (1.2)) применительно к условиям данной задачи можно выразить следующим образом:

$$p_{0изб} = p_{4изб} - \rho_{в}gh \cdot (H - h_4).$$

Избыточное давление $p_{4изб}$ в резервуаре на уровне точки 4 найдем, рассуждая аналогично тому, как это сделано при решении задачи 1.2.3 (см. выражение для вычисления разности давлений в точках A и B) и учитывая сказанное выше о батарейном жидкостном манометре:

$$p_4 = \rho_{рт}g(h_1 - h_4) + (\rho_{рт} - \rho_{в})g(h_3 - h_2).$$

Подставив это выражение в формулу для $p_{0изб}$, получим:

$$\begin{aligned} p_{0изб} &= \rho_{рт}g(h_1 - h_4) + (\rho_{рт} - \rho_{в})g(h_3 - h_2) - \rho_{в}g(H - h_4) = \\ &= (13600 \cdot 9,81(1,0 - 0,8) - 1000 \cdot 9,81(1,2 - 0,8) + \\ &\quad + 13600 \cdot 9,81(1,2 - 0,9) - 1000 \cdot 9,81(3,0 - 0,9)) = \\ &= 9,81(6800 - 2500) = 9,81 \cdot 4300 = 4220 \text{ Па} = 42,2 \text{ кПа}. \end{aligned}$$

Пьезометрическая высота, отвечающая давлению $p_{0изб}$:

$$p_{0изб} / \rho_{в}g = 42200 / (1000 \cdot 9,81) = 4,30 \text{ м}.$$

Задача 1.2.5. Из емкости A (рис. 1.2.7) откачана часть воздуха, благодаря чему вода плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ из открытого в атмосферу резервуара B поднялась по трубке C на высоту $h_{вак} = 2,0 \text{ м}$.

Определить избыточное гидростатическое давление $p_{0изб}$ на свободной поверхности воды в емкости A и на дне резервуара B ($p_{Дизб}$), а также построить эпюру избыточного гидростатического давления на боковую стенку резервуара B , если глубина воды в нем $h = 1,5 \text{ м}$, а угол наклона стенки к горизонту $\alpha = 60^\circ$.

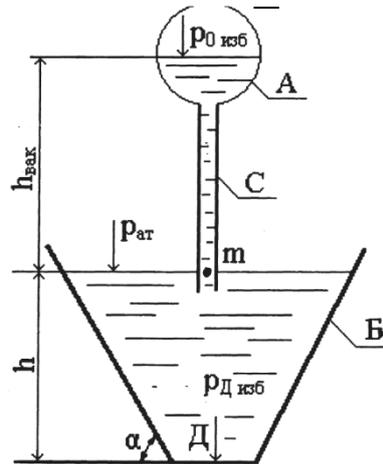


Рис. 1.2.7. Расчетная схема к задаче 1.2.5

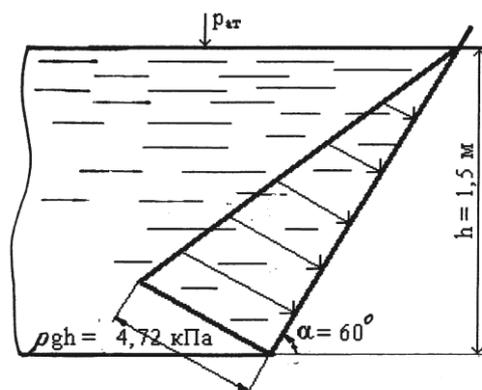
Решение. Величины давлений $p_{0изб}$ и $p_{Dизб}$ вычислим по основному уравнению гидростатики (см. формулу (1.2)), при этом давление $p_{0изб}$ найдем исходя из того, что в точке m (внутри трубки C) абсолютное давление известно и равно атмосферному, поскольку точка m расположена на уровне свободной поверхности, являющейся поверхностью равного давления. Следовательно, избыточное гидростатическое давление в точке m равно нулю. Таким образом, формулу (1.2) можем записать в виде $0 = p_{0изб} + \rho g h_{вак}$, откуда $p_{0изб} = -\rho g h_{вак}$. Подставив в это выражение числовые значения величин, получим:

$$p_{0изб} = -1000 \cdot 9,81 \cdot 2,0 = -19620 \text{ Па} = -19,62 \text{ кПа.}$$

Давление $p_{Dизб}$ в соответствии с формулой (1.2):

$$p_{Dизб} = 0 + \rho g h = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,5 = 14715 \text{ Па} = 14,72 \text{ кПа.}$$

Зная избыточное давление на свободной поверхности жидкости в резервуаре B и на глубине h (0,00 и 14,72 кПа соответственно), построим эпюру избыточного гидростатического давления на наклонную стенку резервуара B (рис. 1.2.8) аналогично тому, как это сделано в задаче 1.2.3 (см. рис. 1.2.4).

Рис. 1.2.8. Эпюра избыточного гидростатического давления на наклонную стенку резервуара B

1.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.3.1. В U -образной трубке, открытой в атмосферу, в равновесии находятся вода и бензин при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.3.1).

Определить плотность бензина ρ_b .

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 1.3.1.

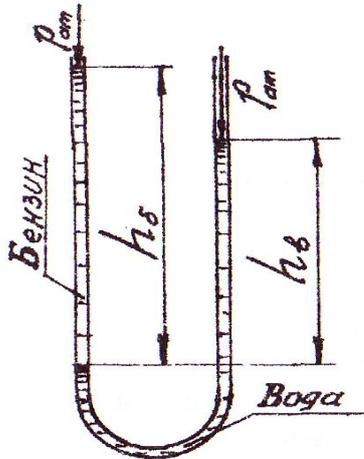


Таблица 1.3.1

№ варианта	h_b , м	h_w , м
1	0,5	0,44
2	0,73	0,64
3	0,96	0,84
4	1,19	1,05
5	1,42	1,25
6	1,65	1,45

Рис. 1.3.1. U -образная трубка, открытая в атмосферу

Задача 1.3.2. Определить разность отметок уровней жидкостей в U -образной трубке (рис. 1.3.2), если в правом колене – ртуть, а в левом – вода (температура жидкостей $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 1.3.2.

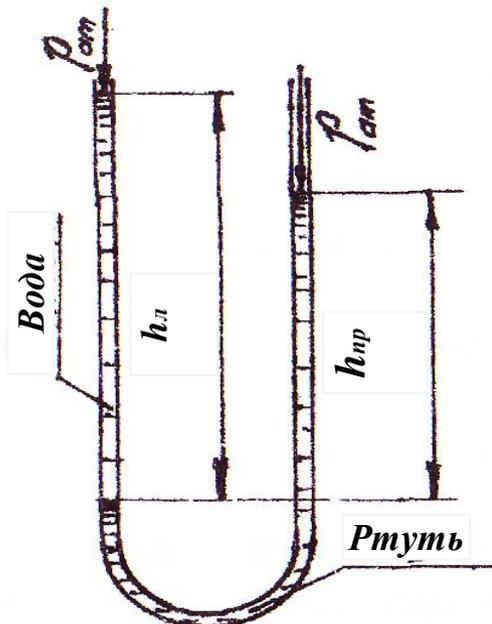


Таблица 1.3.2

№ варианта	h_r , м
1	0,5
2	0,73
3	0,96
4	1,19
5	1,42
6	1,65

Рис. 1.3.2. U -образная трубка

Задача 1.3.3. В открытом цилиндрическом резервуаре диаметром D суммарная глубина воды и бензина H (рис. 1.3.3). В пьезометре, подключенном к воде, ее уровень ниже уровня бензина на величину h .

Определить вес G_b находящегося в резервуаре бензина, если его плотность $\rho_b = 700 \text{ кг/м}^3$, и построить эпюру избыточного гидростатического давления по глубине H .

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 1.3.3.

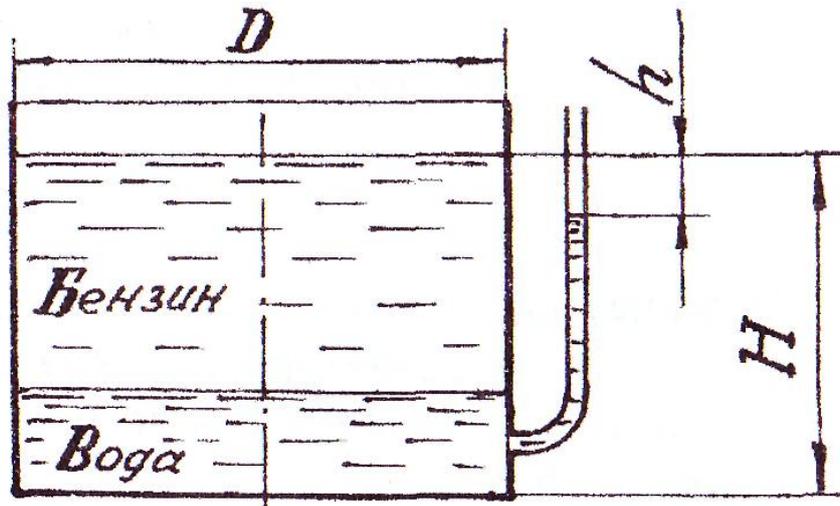


Рис. 1.3.3. Открытый цилиндрический резервуар

Таблица 1.3.3

№ варианта	D , м	H , м	h , м
1	5,2	2,36	1,4
2	6	3,16	1,96
3	6,8	3,96	2,52
4	7,6	4,76	3,08
5	8,4	5,56	3,64
6	9,2	6,36	4,2

Задача 1.3.4. Определить, какое давление будет показывать пружинный мановакуумметр M (рис. 1.3.4), подключенный над свободной поверхностью воды, если показание жидкостного (ртутного) манометра – $h_{рт}$, а превышение свободной поверхности воды в резервуаре над уровнем ртути в правом колене жидкостного манометра – h . Вычислить гидростатический напор $H_{изб}$ для воды, приняв за плоскость сравнения уровень ртути в открытом колене жидкостного манометра. Плотность воды $\rho = 998 \text{ кг/м}^3$, плотность ртути $\rho_{рт} = 13600 \text{ кг/м}^3$.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 1.3.4.

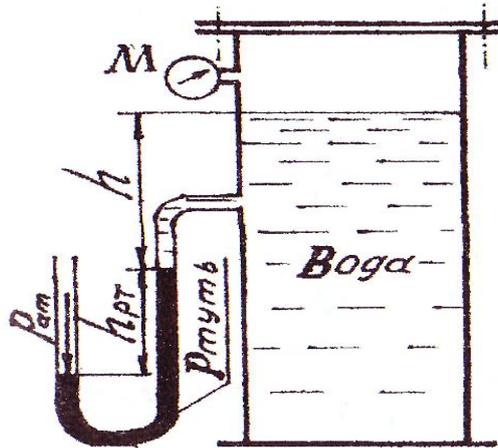
Рис. 1.3.4. Пружинный мановакуумметр M

Таблица 1.3.4

№ варианта	$h_{рт}$, м	h , м
1	0,37	1
2	0,47	2
3	0,27	1,5
4	0,17	1,8
5	0,39	2,2
6	0,29	0,8

Задача 1.3.5. К герметично закрытому резервуару, частично заполненному водой (рис. 1.3.5), подключены пружинный манометр M , показывающий давление $P_{o ман}$, и жидкостный (ртутный) манометр.

Определить показания ртутного манометра $h_{рт}$ и построить эпюру избыточного гидростатического давления по глубине h , если $\rho_{в} = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{рт} = 13546 \text{ кг/м}^3$.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 1.3.5.

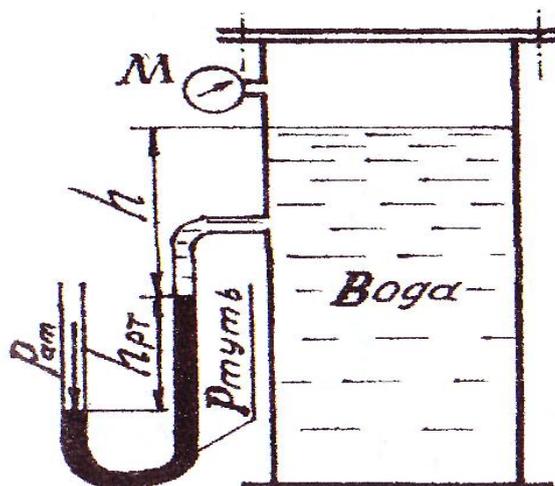


Рис. 1.3.5. Герметично закрытый резервуар

Таблица 1.3.5

№ варианта	$P_{o\text{ ман}}, \text{ кПа}$	$h, \text{ м}$	$h_{рт}, \text{ м}$
1	20	1	0,221468
2	30	2	0,369113
3	40	1,5	0,406024
4	50	1,8	0,501993
5	60	2,2	0,605345
6	70	0,8	0,575816

Задача 1.3.6. Определить избыточное и абсолютное гидростатическое давление в точках 1 и 2 (рис. 1.3.6), заглубленных под уровень свободной поверхности воды соответственно на h_1 и h_2 , если пружинный вакуумметр B показывает давление $P_{\text{вак}}$. Построить эпюру избыточного гидростатического давления на боковую стенку резервуара, наклоненную под углом α° к горизонту.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 1.3.6.

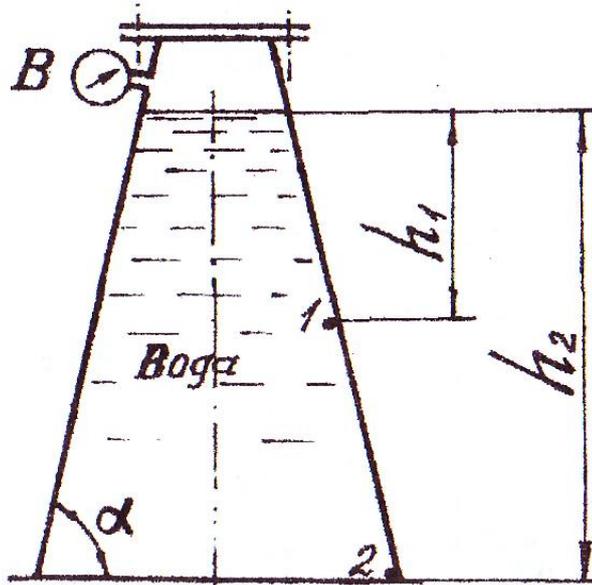


Рис. 1.3.6. К задаче 1.3.6

Таблица 1.3.6

№ варианта	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$	$P_{\text{вак}}, \text{ кПа}$	α°
1	1,2	2,6	8	60
2	1,4	2,4	9,2	30
3	1,6	2,2	10,4	45
4	1,8	2	11,6	60
5	2	1,8	12,8	30
6	2,2	1,6	14	45

Задача 1.3.7. Два герметично закрытых резервуара (рис. 1.3.7) соединены дифференциальным ртутным манометром, показание которого – h_{pm} . В первом резервуаре жидкость плотностью $\rho_1 = 850 \text{ кг/м}^3$, а во втором – $\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$. Внешнее избыточное давление в первом резервуаре – P_{01} . Превышения свободных поверхностей в резервуарах над уровнями ртути в коленах жидкостного манометра составляют h_1 , h_2 , плотность ртути $\rho_{pm} = 13600 \text{ кг/м}^3$.

Определить внешнее избыточное давление P_{02} во втором резервуаре и построить эпюру избыточного гидростатического давления по глубине h_2 .

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 1.3.7.

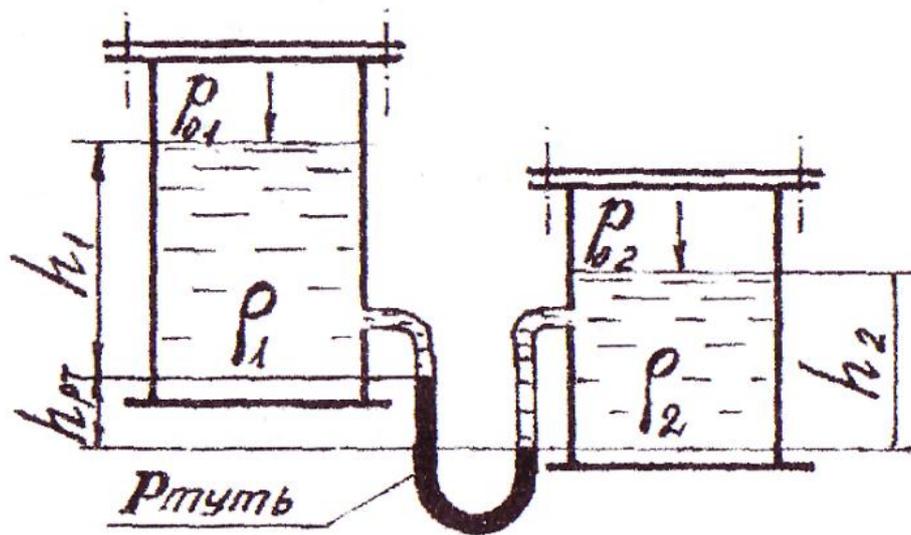


Рис. 1.3.7. К задаче 1.3.7

Таблица 1.3.7

№ варианта	h_{pm} , м	h_1 , м	h_2 , м	P_{01} , кПа
1	0,4	1,6	1,1	56,0
2	0,35	1,8	1,2	58,0
3	0,30	1,9	1,3	66,0
4	0,25	1,55	1,4	48,0
5	0,2	2,6	1,5	49,0
6	0,55	2,6	1,6	62,0

Задача 1.3.8. Для схемы, изображенной на рис. 1.3.8, определить внешнее избыточное давление P_{01} , если $\rho_1 = 800 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{pm} = 13600 \text{ кг/м}^3$. Вычислить гидростатические напоры $H_{изб1}$ и $H_{изб2}$, приняв за плоскость сравнения поверхность раздела ртуть – жидкость плотностью ρ_2 .

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 1.3.8.

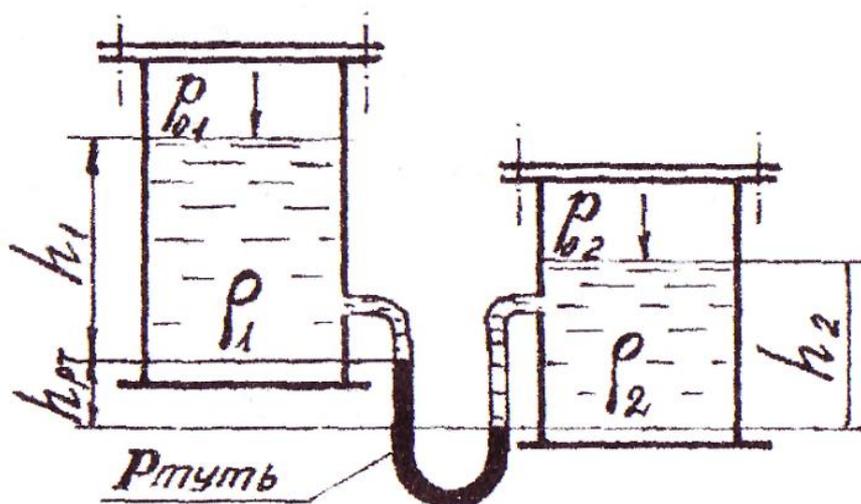


Рис. 1.3.8. К задаче 1.3.8

Таблица 1.3.8

№ варианта	$h_{рт}$, м	h_1 , м	h_2 , м	P_{02} , кПа
1	0,4	2,0	1,5	56,0
2	0,35	1,8	1,2	58,0
3	0,30	1,9	1,3	66,0
4	0,25	1,55	1,4	48,0
5	0,2	2,6	1,5	49,0
6	0,55	2,6	1,6	62,0

Задача 1.3.9. Какая высота столба ртути $h_{рт}$ (рис. 1.3.9) установится при разности давлений $(P_a - P_b)$ в центрах трубопроводов A и B , заполненных водой ($\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$), если центр трубопровода A выше центра трубопровода B на величину z ? Плотность ртути $\rho_{рт} = 13600 \text{ кг/м}^3$.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 1.3.9.

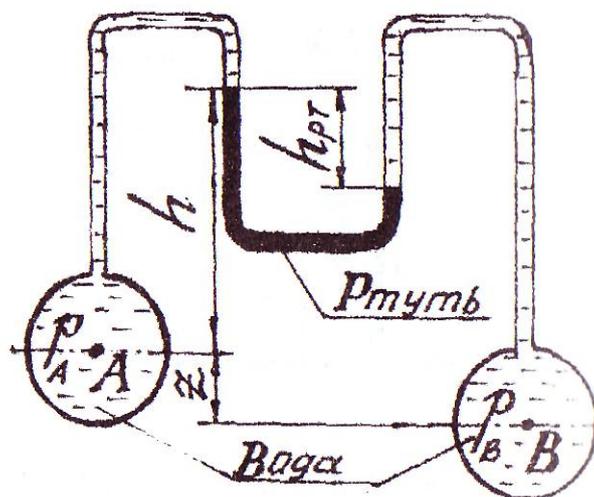


Рис. 1.3.9. К задаче 1.3.9

Таблица 1.3.9

№ варианта	$(P_a - P_\theta)$, кПа	z , м
1	25,0	0,35
2	55,0	0,45
3	75,0	0,55
4	85,0	0,65
5	45,0	0,75
6	35,0	0,85

Задача 1.3.10. Определить высоту H налива нефти в резервуаре (рис. 1.3.10), сообщающемся с атмосферой, если пружинный манометр M , подключенный на высоте h от дна резервуара, показывает давление $P_{ман}$, а плотность нефти $\rho_n = 880 \text{ кг/м}^3$. Построить эпюру избыточного гидростатического давления по глубине H нефти и вычислить гидростатический напор $H_{изб}$ (плоскость сравнения совместить с дном резервуара).

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 1.3.10.

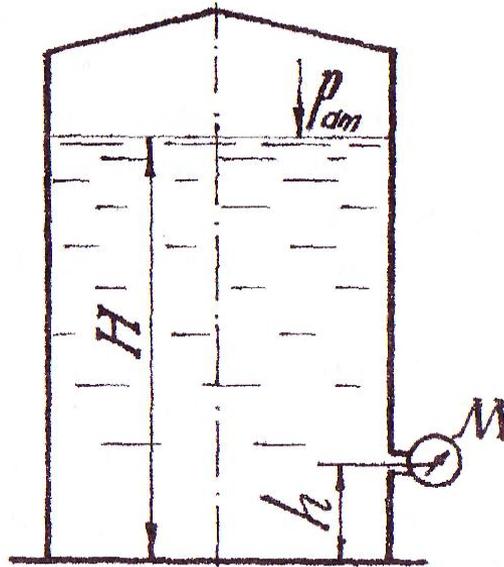


Рис. 1.3.10. К задаче 1.3.10

Таблица 1.3.10

№ варианта	$P_{ман}$, кПа	z , м
1	48,0	1,0
2	84,0	1,5
3	44,0	2,0
4	52,0	2,5
5	76,0	3,5
6	98,0	4,0

2. СИЛА ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

2.1. Основные теоретические положения и расчетные зависимости

При рассмотрении силового воздействия покоящейся жидкости на ограничивающие ее поверхности обычно интересуются равнодействующей силой P избыточного гидростатического давления. Величину этой силы, действующей на плоскую поверхность произвольной формы площадью ω и наклоненной под углом α к горизонту (рис. 2.1.1 и 2.1.2), вычисляют по любой из трех формул.

Первая формула для расчета величина P –

$$P = p_{\text{Сизб}}\omega, \quad (2.1)$$

где $p_{\text{Сизб}}$ – избыточное гидростатическое давление в центре тяжести C площади ω ; ω – площадь плоской поверхности, смачиваемая жидкостью.

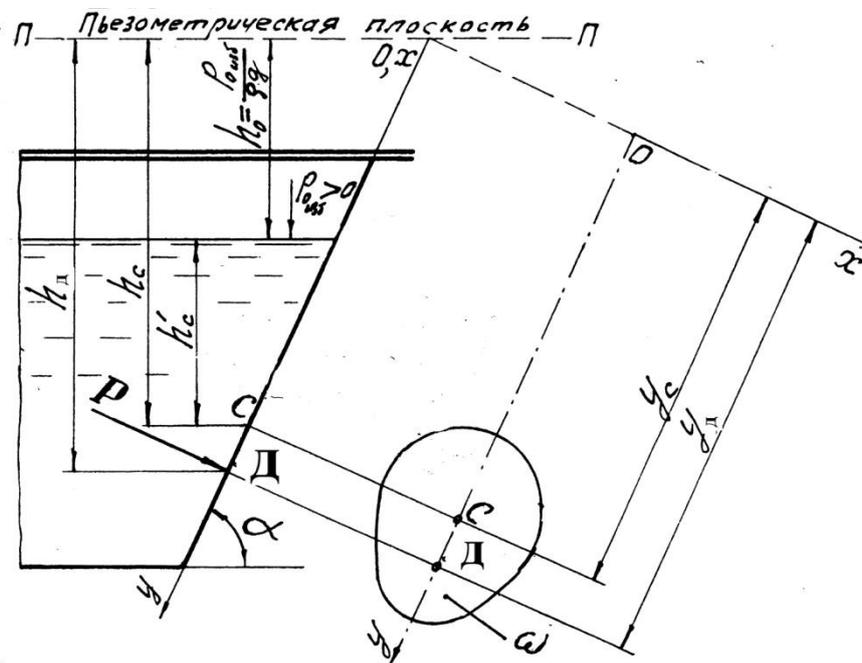


Рис. 2.1.1. К определению равнодействующей силы P избыточного гидростатического давления на плоскую поверхность

Подставив в формулу (2.1) вместо $p_{\text{Сизб}}$ его выражение из основного уравнения гидростатики (1.2), получим вторую формулу для вычисления силы гидростатического давления:

$$P = (p_{0\text{изб}} + \rho gh'_c)\omega, \quad (2.2)$$

где $p_{0\text{изб}}$ – внешнее избыточное давление; $\rho gh'_c$ – весовое давление; h'_c – заглубление центра тяжести C площади ω под уровень свободной поверхности жидкости.

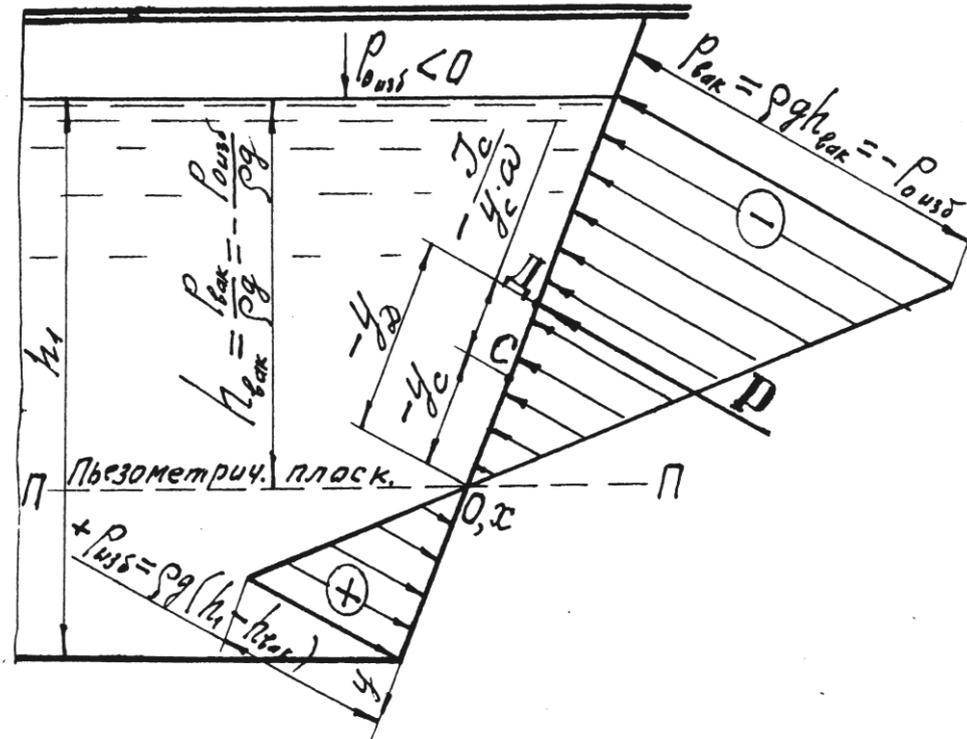


Рис. 2.1.2. К определению положения центра давления D , когда в центре тяжести C отрицательное избыточное гидростатическое давление

Выразив $p_{0изб}$, входящее в формулу (2.2), через пьезометрическую высоту $h_{p0изб}$ (см. рис. 2.1.1 и 2.1.2), получим третью формулу для определения силы P гидростатического давления:

$$P = \rho g(h_{p0изб} + h'_c) = \rho g h_c \omega, \quad (2.3)$$

где h_c – расстояние по вертикали от центра тяжести C площади ω до пьезометрической плоскости (см. рис. 2.1.1).

Сила P приложена в точке D , называемой центром давления (см. рис. 2.1.1 и 2.1.2). Координату y_D центра давления, т. е. расстояние, измеряемое по стенке от оси OX до точки D , вычислим по формуле

$$y_D = y_C + \frac{I_C}{y_C \omega}, \quad (2.4)$$

где y_C – расстояние, измеряемое по стенке от оси OX до центра тяжести C площади ω ; I_C – центральный момент инерции площади ω , т. е. момент инерции относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести C площади ω ; $y_C \omega$ – статический момент площади ω относительно оси OX .

При $p_{0изб} > 0$ центр давления D лежит ниже центра тяжести C площади ω (см. рис. 2.1.1 и 2.1.2). Если же $p_{0изб} < 0$, центр давления D располагается выше центра тяжести C (см. рис. 2.1.2). При этом сила P действует в противоположном, по сравнению с показанным на рис. 2.1.1, направлении.

Если плоская стенка, на которую оказывает давление жидкость, прямоугольная, силу давления на нее жидкости можно определить графоаналитическим методом, основанным на использовании эпюры гидростатического давления.

На рис. 2.1.3 дан пример определения силы P избыточного гидростатического давления графоаналитическим методом на плоский щит, закрывающий прямоугольное отверстие высотой a и шириной b . В данном случае эпюра гидростатического давления на щит представляет собой трапецию высотой a с основаниями ρgh_1 и ρgh_2 .

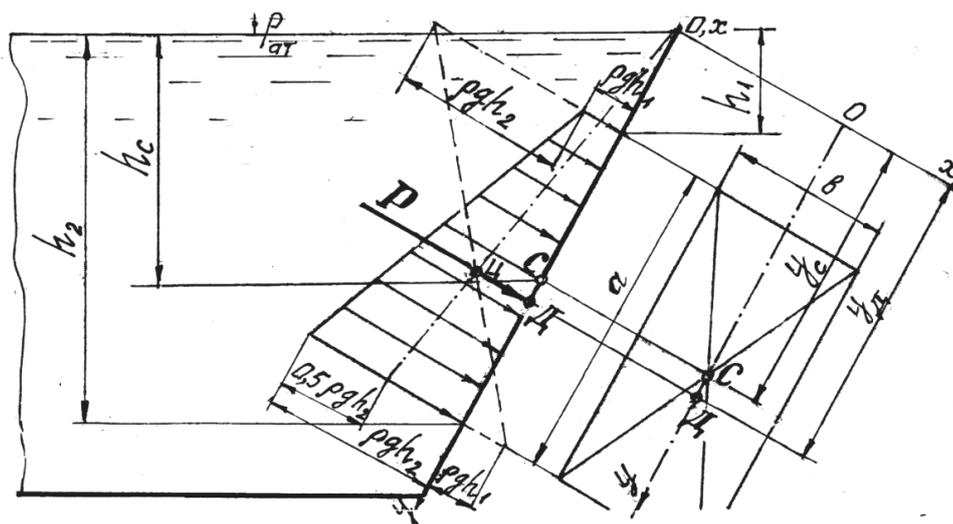


Рис. 2.1.3. К определению равнодействующей силы P избыточного гидростатического давления на плоскую прямоугольную стенку графоаналитически

Площадь эпюры

$$\Omega = \frac{\rho gh_1 + \rho gh_2}{2} a$$

численно равна силе избыточного давления жидкости на единицу ширины щита. Следовательно, на весь щит шириной b действует сила

$$P = \frac{\rho gh_1 + \rho gh_2}{2} ab = \Omega b. \quad (2.5)$$

Справедливость формулы (2.5) доказывается тем, что в ней $(h_1 + h_2) / 2 = h_C$, $ab = \omega$, после чего эта формула становится идентичной формуле (2.3).

Линия действия силы P проходит через центр тяжести C площади эпюры Ω перпендикулярно к плоскости щита (см. рис. 2.1.3). Точка встречи линии действия силы P со щитом является центром давления D . Координату u_D центра давления при графоаналитическом методе решения задачи определяют по чертежу стенки, измеряя отрезок OD (см. рис. 2.1.3) и умножая его длину на масштаб.

2.2. Примеры решения задач

Задача 2.2.1. Глубина воды перед щитом $h = 2,0$ м, ширина щита $b = 1,4$ м.

Определить величину силы P давления воды на прямоугольный щит, наклоненный под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту, и координату y_D центра давления D (рис. 2.2.1).

Решить задачу аналитическим и графоаналитическим методами.

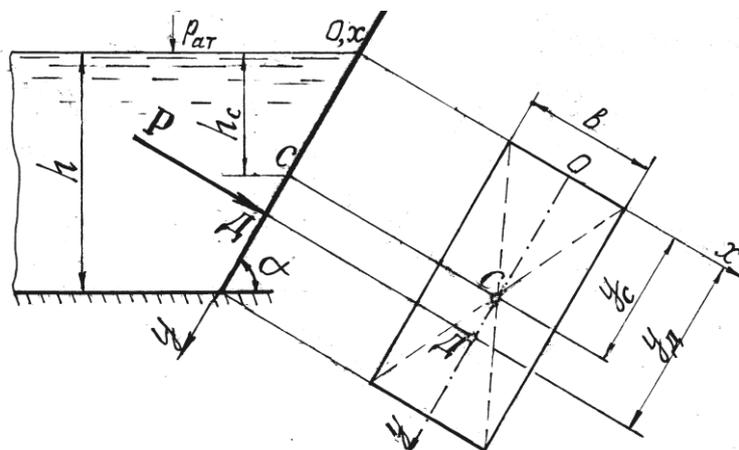


Рис. 2.2.1. Расчетная схема к определению силы P давления воды на прямоугольный плоский щит

Аналитическое решение. Величину силы P вычислим по формуле (2.3). Для условий настоящей задачи $h_C = h/2$, $\omega = hb / \sin \alpha$, поэтому формула (2.3) принимает вид

$$P = \rho g \frac{h \cdot h}{2 \sin \alpha} b = \rho g \frac{h^2}{2 \sin \alpha} b.$$

Подставив в это выражение числовые значения величин, найдем силу давления воды на щит:

$$P = 1000 \cdot 9,81 \frac{2^2}{2 \cdot 0,87} 1,4 = 31572 \text{ Н} = 31,57 \text{ кН}.$$

Координату y_D центра давления D вычислим по формуле (2.4). Величины, входящие в эту формулу, для условий нашей задачи выражаются следующим образом:

$$y_C = \frac{h_C}{\sin \alpha} = \frac{h}{2 \sin \alpha};$$

$$I_C = \frac{bh^3}{12 \sin \alpha};$$

$$\omega = \frac{hb}{\sin \alpha}.$$

Записав формулу (2.4) с учетом выражений для y_C , I_C , ω и подставив числовые значения величин, получим:

$$y_D = \frac{h}{2 \sin \alpha} + \frac{bh^3 2 \sin \alpha \sin \alpha}{12 \sin \alpha h h b} =$$

$$= \frac{h}{2 \sin \alpha} + \frac{h}{6 \sin \alpha} = \frac{2h}{3 \sin \alpha} = \frac{22}{30,87} = 1,53 \text{ м.}$$

Графоаналитическое решение. В основе решения задачи названным методом лежит использование эпюры гидростатического давления, построенной на прямоугольный щит.

Величину силы P найдем через площадь Ω эпюры гидростатического давления по формуле (2.5).

Для построения эпюры предварительно найдем гидростатическое давление в нижней точке щита, т. е. на глубине $h = 2,0$ м, и на свободной поверхности воды, т. е. при $h = 0,00$ м, и примем масштабы: для расстояний – 1:25, для давлений в 1 см – 5 кПа. Построенная эпюра представляет собой прямоугольный треугольник (рис. 2.2.2).

Вычислим площадь эпюры гидростатического давления воды на щит:

$$\Omega = \frac{\rho g h^2}{2 \sin \alpha} = \rho g \frac{h^2}{2 \sin \alpha} = 1000 \cdot 9,81 \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 0,87} = 22552 \frac{\text{Н}}{\text{м}},$$

а затем и силу P давления воды на весь щит, умножив площадь Ω на ширину щита b :

$$P = \Omega b = 22552 \cdot 1,40 = 31572 \text{ Н} = 31,57 \text{ кН.}$$

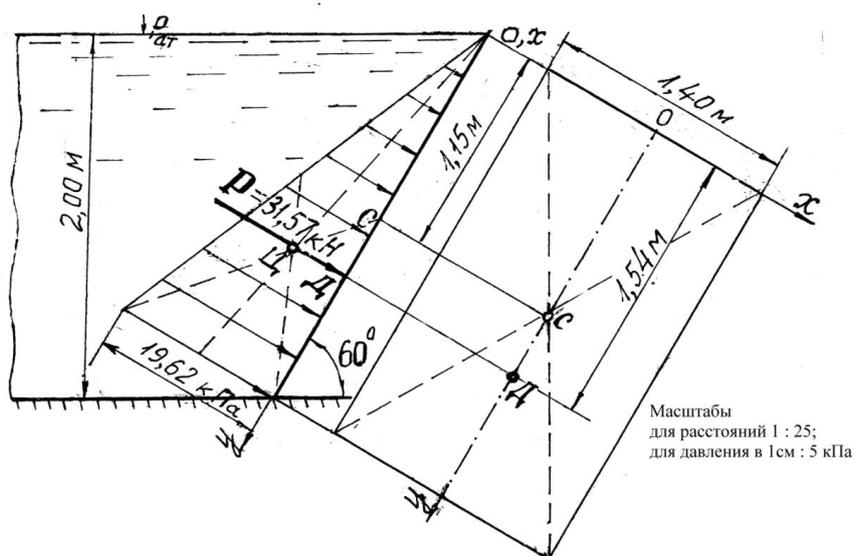


Рис. 2.2.2. Определение силы давления воды P и координаты центра давления D на прямоугольный щит графоаналитическим методом

Для нахождения центра давления D и его координаты и его координаты y_D определим графически центр тяжести C площади Ω эпюры

гидростатического давления (в нашем случае точка C находится на пересечении медиан треугольника). Проводим через точку C перпендикуляр к щиту и в точке его встречи со щитом получаем центр давления D . Измерив по стенке расстояние от оси OX до точки D и умножив его на масштаб, находим координату центра давления $y_D = 1,54$ м (см. рис. 2.2.2).

Сравнивая величины P и y_D , полученные аналитическим и графоаналитическим методами, видим, что значения силы P оказались одинаковыми, а относительное расхождение значений y_D составляет:

$$\varepsilon_{y_D} = \frac{y_{D_{гр}} - y_D}{y_D} \cdot 100 = \frac{1,54 - 1,53}{1,53} \cdot 100 = 0,65 \%,$$

что значительно меньше предельного, равного 5 %.

Задача 2.2.2. Определить результирующую силу P давления воды на наклонный прямоугольный затвор (рис. 2.2.3) и координату y_D центра давления аналитическим и графоаналитическим методами. Ширина затвора $b = 4,0$ м, глубина воды перед затвором $h_1 = 3,0$ м, за ним $h_2 = 1,0$ м. Угол наклона затвора к горизонту $\alpha = 60^\circ$. Затвор может вращаться вокруг горизонтальной оси. Превышение оси вращения над уровнем воды перед затвором $a = 0,6$ м.

Определить также силу T , необходимую для подъема щита, пренебрегая его весом и трением.

Решение. Результирующая сила P давления воды на затвор равна алгебраической сумме сил P_1 и P_2 давления воды на затвор слева и справа, т. е. $P = P_1 - P_2$, поэтому прежде всего определим силы P_1 и P_2 и координаты y_{D1} и y_{D2} центров их давления. Имея силы P_1 , P_2 , P и координаты y_{D1} и y_{D2} , можно, составив уравнение моментов сил относительно оси вращения затвора, найти координату y_D центра давления силы P .

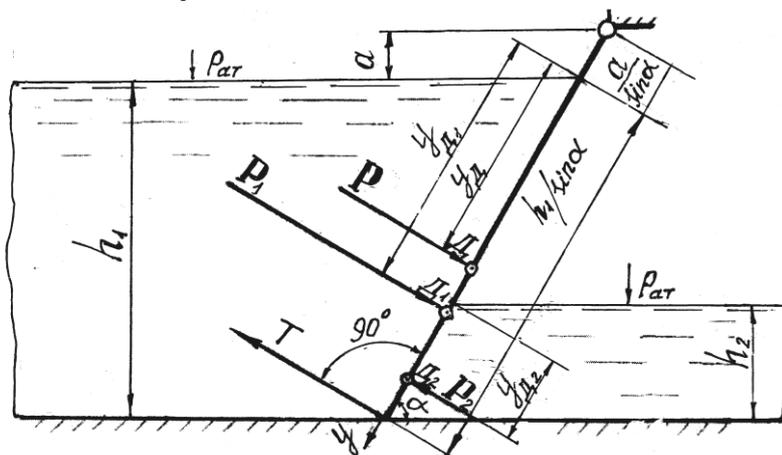


Рис. 2.2.3. Схема к определению силы P давления воды на прямоугольный затвор

Аналитическое решение. Воспользовавшись формулами (2.3) и (2.4), вычислим предварительно P_1 и P_2 , а также $y_{Д1}$ и $y_{Д2}$:

$$P_1 = \rho g h_{c_1} \omega_1 = \rho g \frac{h_1}{2} \cdot \frac{h_1}{\sin \alpha} b = \rho g \frac{h_1^2}{2 \sin \alpha} b =$$

$$= 1000 \cdot 9,81 \frac{3^2}{2 \sin 60^\circ} 4 = 9810 \frac{9}{2 \cdot 0,87} 4 = 202965 \text{ Н} = 202,96 \text{ кН};$$

$$P_2 = \rho g \frac{h_2^2}{2 \sin \alpha} b = 1000 \cdot 9,81 \frac{1^2}{2 \cdot 0,87} 4 = 22660 \text{ Н} = 22,66 \text{ кН};$$

$$y_{Д1} = y_{c_1} + \frac{I_{c_1}}{y_{c_1} \omega_1} = \frac{h_1}{2 \sin \alpha} + \frac{bh_1^3 \cdot 2 \sin \alpha \cdot \sin \alpha}{12 \sin \alpha h_1 b h_1} =$$

$$= \frac{h_1}{2 \sin \alpha} + \frac{h_1}{6 \sin \alpha} = \frac{2h_1}{3 \sin \alpha} = \frac{2 \cdot 3}{3 \cdot 0,87} = 2,31 \text{ м};$$

$$y_{Д2} = \frac{2h_2}{3 \sin \alpha} = \frac{2 \cdot 1}{3 \cdot 0,87} = 0,77 \text{ м}.$$

Найдем силу P давления воды на затвор как разность сил P_1 и P_2 , поскольку направления их действия противоположны:

$$P = P_1 - P_2 = 202,96 - 22,66 = 180,30 \text{ кН}.$$

Определим силу T . Для этого составим уравнение моментов сил P_1 , P_2 и T относительно оси вращения затвора:

$$-T \cdot \left(\frac{h_1 + a}{\sin \alpha} \right) - P_2 \left(y_{Д2} + \frac{h_1 - h_2 + a}{\sin \alpha} \right) + P_1 \left(y_{Д1} + \frac{a}{\sin \alpha} \right) = 0,$$

откуда

$$T = \frac{P_1 \left(y_{Д1} + \frac{a}{\sin \alpha} \right) - P_2 \left(y_{Д2} + \frac{h_1 - h_2 + a}{\sin \alpha} \right)}{\frac{h_1 + a}{\sin \alpha}} =$$

$$= \frac{202,96(2,31 + 0,69) - 22,66(0,77 + 3)}{4,15} = 126,13 \text{ кН}.$$

Для нахождения величины y_D составим уравнение моментов сил P и T относительно оси вращения затвора:

$$-T \left(\frac{h_1 + a}{\sin \alpha} \right) + P \left(y_D + \frac{a}{\sin \alpha} \right) = 0,$$

откуда

$$y_D = \frac{T \left(\frac{h_1 + a}{\sin \alpha} \right) - P \left(\frac{a}{\sin \alpha} \right)}{P} = \frac{126,13 \cdot 4,15 - 180,3 \cdot 0,69}{180,3} = 2,21 \text{ м}.$$

Графоаналитическое решение. Построим в масштабе эпюры гидростатического давления на затвор слева и справа (рис. 2.2.4).

Разность площадей этих эпюр (площадь трапеции $ABKL$), умноженная на ширину b затвора, численно равна искомой силе P , т. е.

$$P = \frac{h_1 + h_2}{2 \sin \alpha} (\rho g h_1 + \rho g h_2) b = \frac{h_1 + h_2}{2 \sin \alpha} \rho g (h_1 - h_2) b =$$

$$= \frac{3+1}{2 \cdot 0,867} 1000 \cdot 9,81 \cdot (3-1) \cdot 4 = 181040 \text{ Н} = 181,04 \text{ кН}.$$

Для нахождения положения центра давления (точка D) определим центр тяжести C трапеции $ABKL$ и проведем через него перпендикуляр к плоскости затвора. Точка пересечения перпендикуляра с затвором будет центром давления D . Измерив отрезок AD (рис. 2.2.4) и умножив его на масштаб, получим координату $Y_D = 2,20$ м.

Сравнивая величины P и Y_D , находим, что разница между ними составляет 0,4 (при использовании аналитического метода) и 0,5 % (применялся графоаналитический метод), т. е. значительно меньше предельной допустимой погрешности, равной 5 %. Одновременно мы убедились, что графоаналитическое решение задачи проще и нагляднее аналитического.

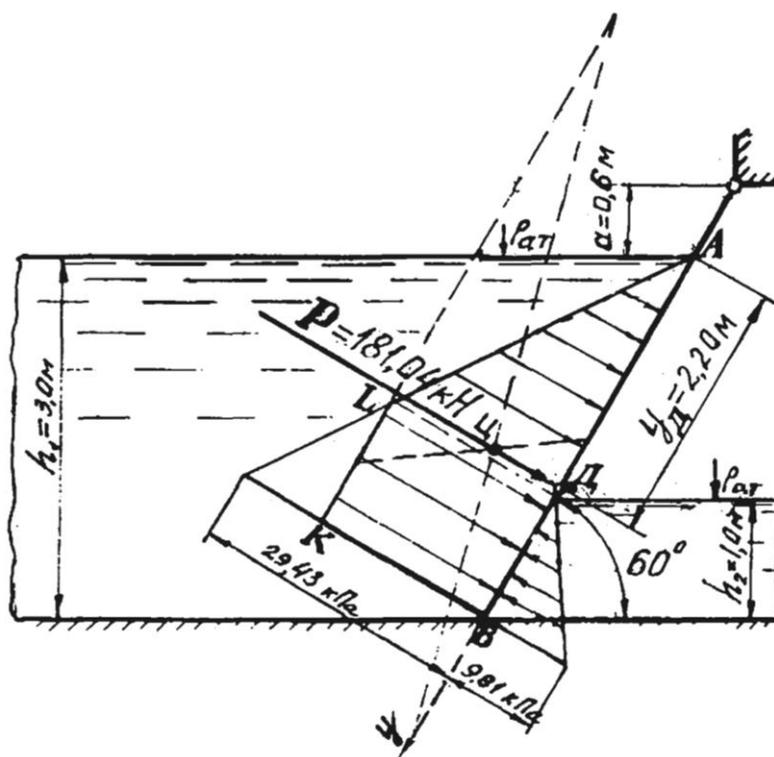


Рис. 2.2.4. К определению равнодействующей силы P давления воды на прямоугольный затвор графоаналитическим методом

Задача 2.2.3. Цилиндрическая цистерна диаметром $d = 2,4$ м (рис. 2.2.5) заполнена бензином до верха горловины (высота последней $h_{\Gamma} = 0,6$ м). Плотность бензина $\rho_{\text{б}} = 740 \text{ кг/м}^3$.

Определить силу давления бензина P на торцевую плоскую стенку цистерны и координату h_D точки ее приложения.

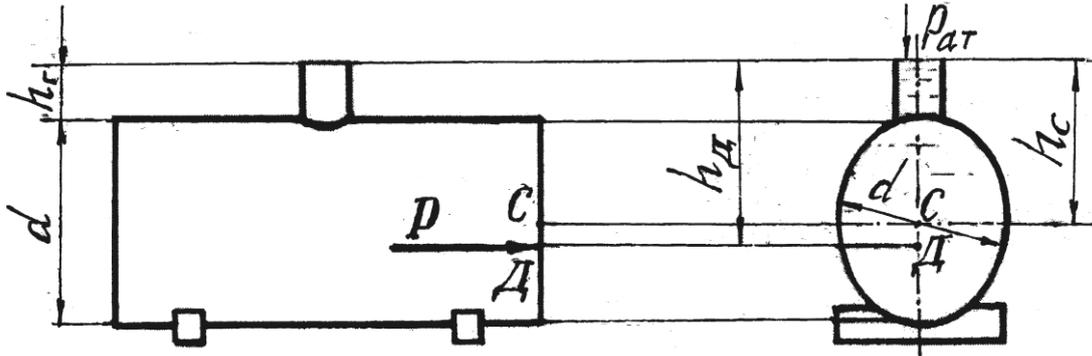


Рис. 2.2.5. Схема к определению силы P давления бензина на плоскую торцевую стенку цистерны

Решение. Силу P давления бензина вычислим по формуле (2.3), которую для условий задачи запишем в виде

$$P = \rho_{\text{б}} g \left(\frac{d}{2} + h_r \right) \frac{\pi d^2}{4} = 740 \cdot 9,81 \left(\frac{2,4}{2} + 0,6 \right) \frac{3,14 \cdot 2,4^2}{4} = 59000 \text{ Н.}$$

Координату h_D центра давления D (точки приложения силы P) вычислим по формуле (2.4), записанной для условий данной задачи. После подстановки в нее числовых значений величин получим:

$$\begin{aligned} h_D &= h_c + \frac{I_C}{h_c \omega} = \left(\frac{d}{2} + h_2 \right) + \frac{\pi d^4 \cdot 4}{64 \left(\frac{d}{2} + h_r \right) \pi d^2} = \\ &= \left(\frac{d}{2} + h_r \right) + \frac{d^2}{16 \left(\frac{d}{2} + h_r \right)} = \left(\frac{2,4}{2} + 0,6 \right) + \frac{2,4^2}{16 \left(\frac{2,4}{2} + 0,6 \right)} = 1,8 + 0,2 = 2,0 \text{ м.} \end{aligned}$$

Задача 2.2.4. Поворотный клапан AB закрывает выход из бензохранилища в трубу квадратного сечения со стороной $h = 0,3$ м (рис. 2.2.6). Прямоугольная пластина клапана AB опирается на срез трубы, выполненный под углом $\alpha = 45^\circ$. В трубе бензин отсутствует.

Определить силу натяжения троса T , необходимую для открывания клапана (без учета его веса и трения в шарнире A и в ролике K), если превышение уровня бензина над нижней точкой B клапана составляет $H = 0,85$ м, а давление на свободной поверхности бензина, показываемое манометром M , $p_{\text{ман}} = 5$ кПа. Плотность бензина $\rho_{\text{б}} = 700$ кг/м³.

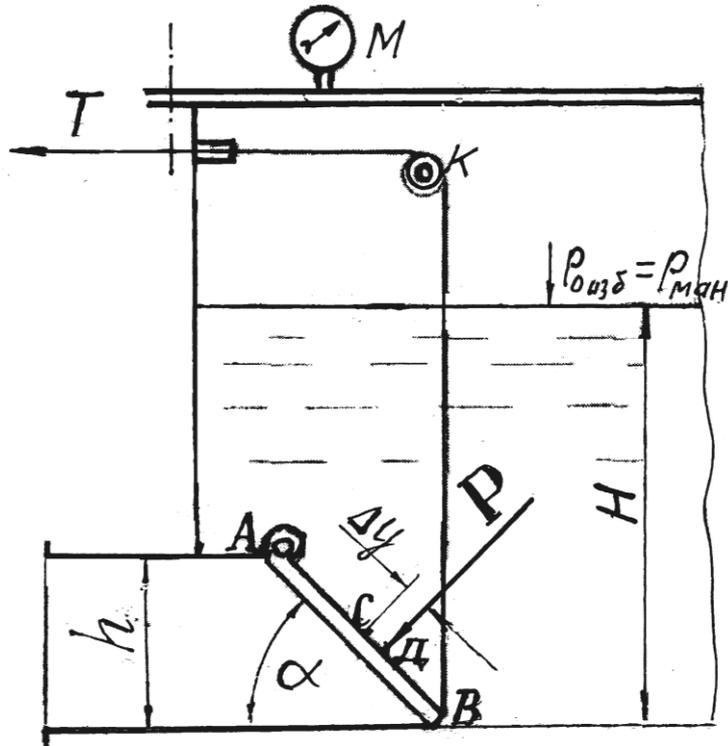


Рис. 2.2.6. Расчетная схема к определению силы давления бензина на плоский прямоугольный клапан AB

Решение. Очевидно, что сила давления бензина P на клапан AB , приложенная в центре давления D , будет препятствовать открыванию клапана.

Силу натяжения троса T найдем из уравнения моментов сил относительно шарнира A :

$$T \cdot h \cdot \operatorname{ctg} \alpha = P \cdot \left(\frac{h}{2 \sin \alpha} + \Delta y \right),$$

где $h \operatorname{ctg} \alpha$ – плечо силы T относительно шарнира A ; $P = p_c \omega = \rho_0 g h_c \omega = \rho_0 g (p_{\text{ман}} / \rho_0 g + H - 0,5) h^2 / \sin \alpha$ – сила давления бензина на клапан (см. формулу (2.3) и рис. 2.2.1); $\Delta y = I_C / y_C \omega$ – смещение центра давления относительно центра тяжести C клапана (см. формулу (2.4) и рис. 2.2.1); $(h/2 \sin \alpha) + \Delta y$ – плечо силы P относительно шарнира A .

Для условий данной задачи центральный момент инерции I_C смоченной площади ω клапана AB и координата y_C центра тяжести C соответственно:

$$I_C = \frac{h \cdot h^3}{12 \sin^3 \alpha} = \frac{h^4}{12 \sin^3 \alpha};$$

$$y_C = \left(\frac{P_{\text{ман}}}{\rho_0 g} + H - 0,5h \right) \frac{I}{\sin \alpha}.$$

Определим величины P и Δy , входящие в уравнение моментов сил:

$$P = 700 \cdot 9,81 \left(\frac{5000}{700 \cdot 9,81} + 0,85 - 0,5 \cdot 0,3 \right) \frac{0,3^2}{0,707} = 1270 \text{ Н} = 1,27 \text{ кН};$$

$$\begin{aligned} \Delta y &= \frac{h^4 \sin \alpha \sin \alpha}{12 \sin^3 \alpha \left(\frac{P_{\text{ман}}}{\rho_0 g} + H - 0,5h \right)} = \frac{h^2}{12 \sin \alpha \left(\frac{P_{\text{ман}}}{\rho_0 g} + H - 0,5h \right)} = \\ &= \frac{0,3^3}{12 \cdot 0,707 \left(\frac{5000}{700 \cdot 9,81} + 0,85 - 0,5 \cdot 0,3 \right)} = 0,0074 \text{ м}. \end{aligned}$$

Вычислим силу T натяжения троса:

$$T = \frac{P \left(\frac{h}{2 \sin \alpha} + \Delta y \right)}{h \cdot \text{ctg} \alpha} = \frac{1,27 \left(\frac{0,3}{2 \cdot 0,707} + 0,0074 \right)}{0,3 \cdot 1} = 928 \text{ Н} = 0,93 \text{ кН}.$$

Задача 2.2.5. Канал прямоугольного сечения шириной $b = 2$ м перегороден вертикальным плоским щитом (рис. 2.2.7). Глубина воды перед щитом $h = 3,0$ м. Вес щита $G = 20$ кН. Коэффициент трения в пазах канала при подъеме щита $f = 0,25$.

Определить силу P давления воды на щит и координату h_D центра давления аналитическим и графоаналитическим методами, а также усилие T , которое нужно приложить для подъема щита.

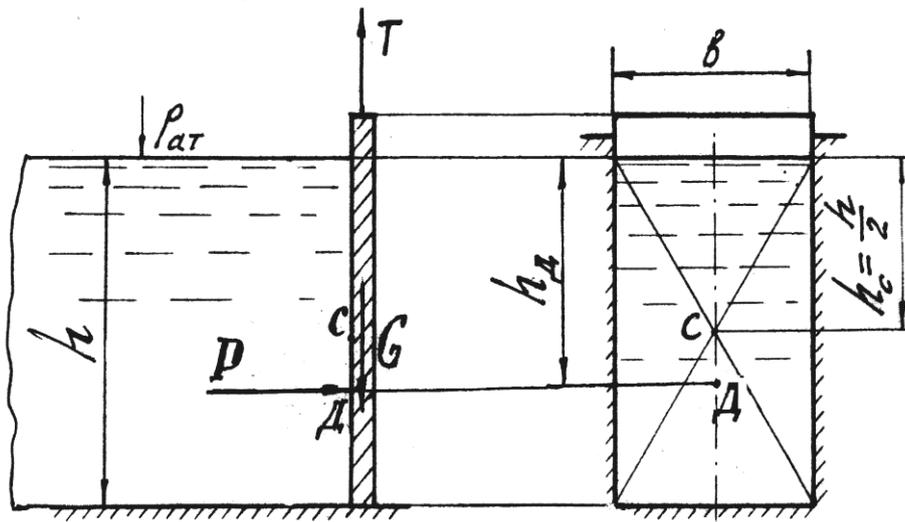


Рис. 2.2.7. Схема к определению силы давления воды на прямоугольный вертикальный щит

Решение. Определим величины P и h_D аналитическим методом. Для этого воспользуемся формулами (2.3) и (2.4) и получим:

$$P = 9,8 \cdot 1000 \cdot (3/2) \cdot (3 \cdot 2) = 88,2 \text{ кН};$$

$$h_D = 1,5 + (2 \cdot 3^3 \cdot 2 / 12 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3) = 1,5 + (3/6) = 2,0 \text{ м}.$$

Для определения величин P и h_D графоаналитическим методом построим эпюру избыточного гидростатического давления на щит (рис. 2.2.8). В данном случае эпюра представляет собой прямоугольный треугольник OAB с основанием $\rho gh = 1000 \cdot 9,81 \cdot 3,0 = 29430 \text{ Па} = 29,43 \text{ кПа}$ и высотой $h = 3,0 \text{ м}$. Площадь этой эпюры $\Omega = \rho gh^2 / 2$ численно равна силе давления воды, приходящейся на единицу ширины щита, т. е. $\Omega = 29,43 \text{ кПа} \cdot 1,5 \text{ м} = 44,145 \text{ кПа/м} = 44,145 \text{ кН/м}$.

Сила давления воды на весь щит шириной $b = 2,0 \text{ м}$ равна объему эпюры гидростатического давления $P = \Omega b$, т. е.

$$P = 44,145 \text{ кН/м} \cdot 2,0 \text{ м} = 88,29 \text{ кН}.$$

Для нахождения центра давления D сначала определим графически центр тяжести C эпюры гидростатического давления (он находится в точке пересечения медиан треугольника OAB), т. е. на глубине $2/3 h$. Затем через точку C проводим перпендикуляр к плоскости щита. Линия действия силы P совпадает с этим перпендикуляром, а точка его встречи с плоскостью щита дает центр давления D , координата которого

$$h_D = (2/3) h = (2/3) \cdot 3 = 2 \text{ м}.$$

Сравнивая величины h_D и P , полученные аналитическим и графоаналитическим методами, видим, что они одинаковы.

Усилие T , необходимое для подъема щита, вычислим по формуле, известной из курса физики:

$$T = G + fP = 20 + 0,25 \cdot 88,29 = 20 + 22,07 = 42,07 \text{ кН}.$$

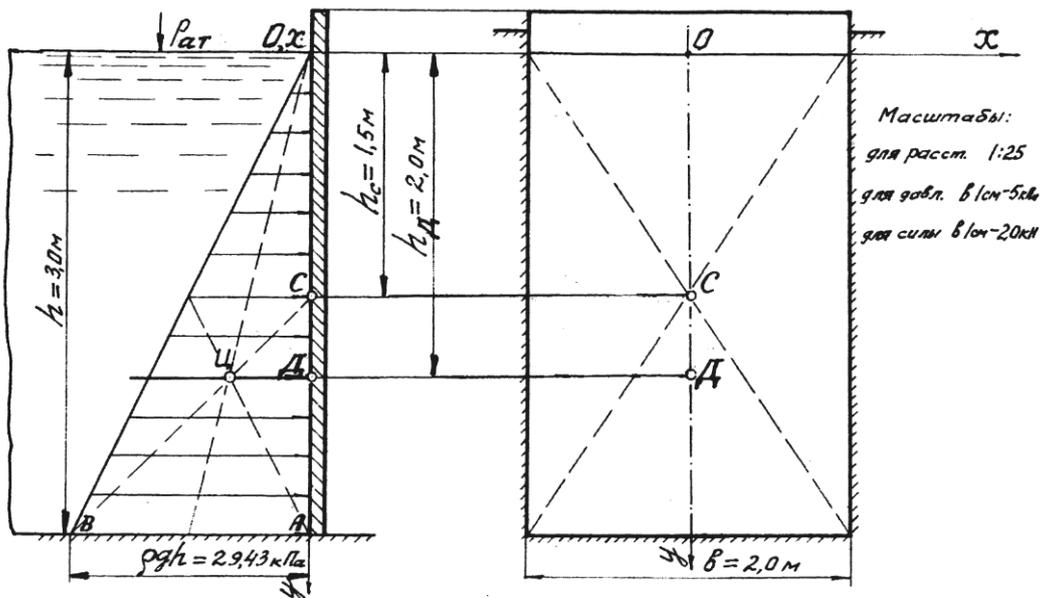


Рис. 2.2.8. К определению силы давления воды на прямоугольный вертикальный щит графоаналитическим методом

2.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 2.3.1. Определить силы манометрического давления воды на грани AB , BC и CE устоя (рис. 2.3.1), а также центры давления этих сил. Расчет выполнить аналитическим и графоаналитическим способами.

Глубина воды перед устоем – h . Высота грани AB – h_1 , высота грани CE – h_3 , угол наклона грани BC к горизонту – α . Ширина устоя – b .

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 2.3.1.

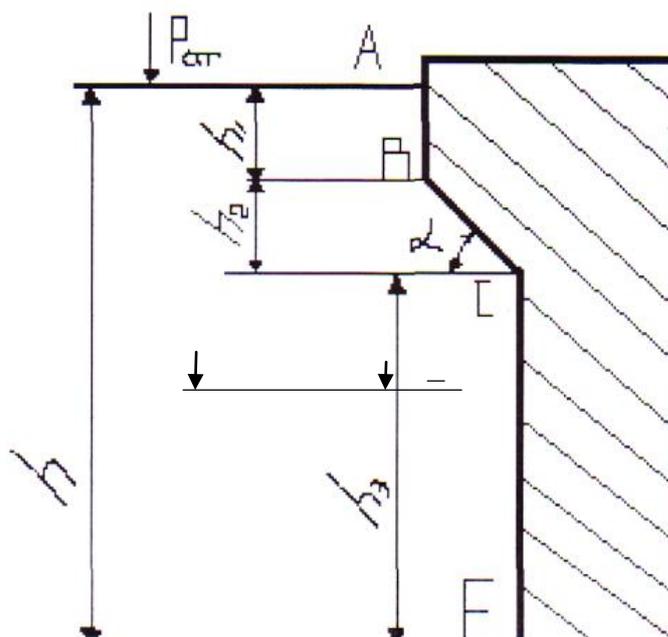


Рис. 2.3.1. К задаче 2.3.1

Таблица 2.3.1

№ варианта	h_1 , м	h_2 , м	h_3 , м	b , м
1	0,8	0,5	1,8	5
2	1,0	1,5	2,0	6
3	1,8	0,8	3,8	7
4	1,5	2,5	2,6	8
5	2,3	3,5	2,8	9
6	1,2	1,5	3,4	7

Задача 2.3.2. Определить коэффициенты устойчивости стенки (рис. 2.3.2) на сдвиг и опрокидывание. Плотность кладки – $\rho_{кл}$, коэффициент трения стенки по основанию – f . Построить эпюры весового давления воды на вертикальные и горизонтальные грани стенки.

Указание. Расчет выполнить на 1 пог. м длины стенки аналитическим и графоаналитическим способами при данных, приведенных в табл. 2.3.2.

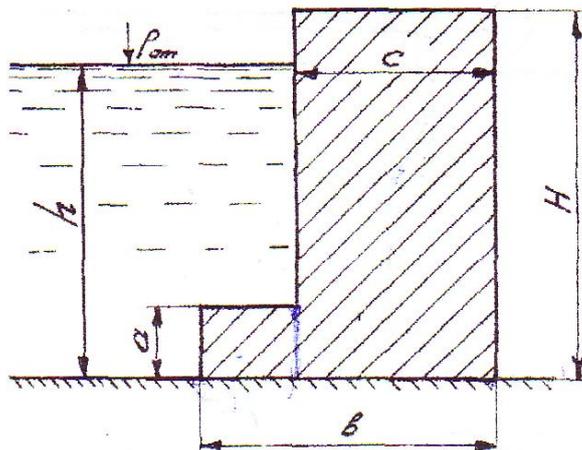


Рис. 2.3.2. К задаче 2.3.2

Таблица 2.3.2

№ варианта	H , м	h , м	b , м	c , м	a , м	$\rho_{\text{кл}}$, кг/м ³	f
1	6,0	4,5	3,5	2,6	0,8	2200	0,3
2	5,5	5,0	3,8	2,5	1,0	2300	0,34
3	6,5	5,3	4,5	2,6	0,8	2400	0,35
4	7,5	5,5	4,8	2,5	1,0	2400	0,38
5	7,0	6,5	5,5	2,6	0,8	2500	0,39
6	8,5	7,5	5,8	2,5	1,0	2300	0,3

Задача 2.3.3. Прямоугольный вертикальный щит, перегородивающий прямоугольный канал шириной b , находится в пазах (рис. 2.3.3). Вес щита – G , коэффициент трения в пазах $f = 0,5$. Глубина воды перед щитом – h_1 , за щитом – h_2 .

Определить усилие T , необходимое для поднятия щита.

Указание. Расчет выполнить аналитическим и графоаналитическим способами при данных, приведенных в табл. 2.3.3.

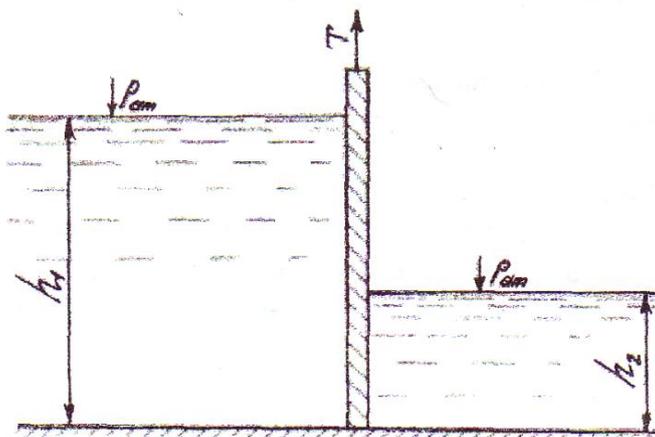


Рис. 2.3.3. К задаче 2.3.3

Таблица 2.3.3

№ варианта	b , м	G , кН	h_1 , м	h_2 , м
1	4,0	4,9	3,0	1,0
2	3,0	3,7	3,0	1,5
3	5,0	5,9	4,0	2,0
4	6,0	5,7	4,0	2,5
5	7,0	4,2	5,0	3,0
6	8,0	4,7	5,0	3,5

Задача 2.3.4. Определить горизонтальную и вертикальную составляющие силы давления воды на 1 пог. м подпорной стенки (рис. 2.3.4).

Указание. Горизонтальную составляющую силы давления воды определить аналитическим и графоаналитическим методами, вертикальную – только аналитическим методом.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 2.3.4.

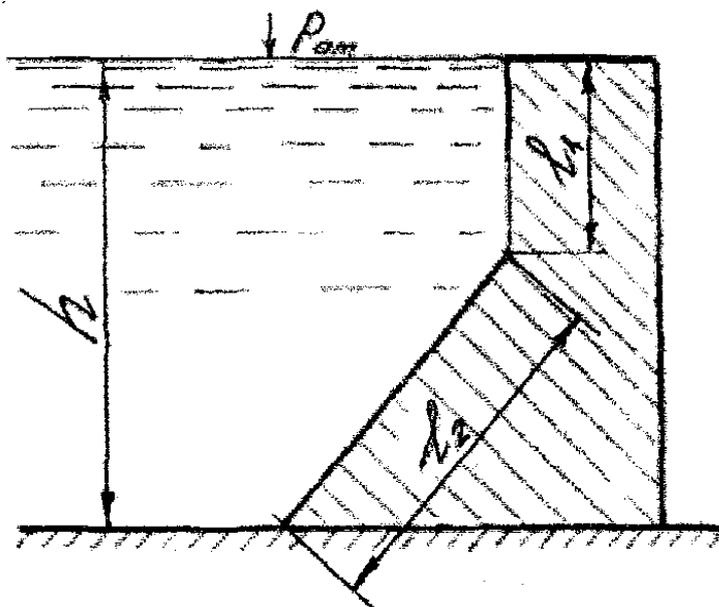


Рис. 2.3.4. К задаче 2.3.4

Таблица 2.3.4

№ варианта	b , м	l_1 , м	l_2 , м	h , м
1	3,0	1,0	2,2	2,0
2	2,0	2,0	3,2	4,2
3	4,0	2,5	4,2	5,2
4	5,0	1,5	3,8	4,8
5	5,5	1,8	3,2	3,2
6	6,0	3,0	4,0	6,0

Задача 2.3.5. Определить усилия T_1 и T_2 , необходимые для открывания прямоугольного вертикального затвора высотой a и шириной b , при заглублении верхней точки затвора под уровень воды на величину h (рис. 2.3.5) для двух вариантов расположения шарнира A (в нижней и верхней точках затвора).

Указание. Момент силы тяжести затвора и трение в шарнире не учитывать.

Расчет выполнить аналитическим и графоаналитическим способами при данных, приведенных в табл. 2.3.5.

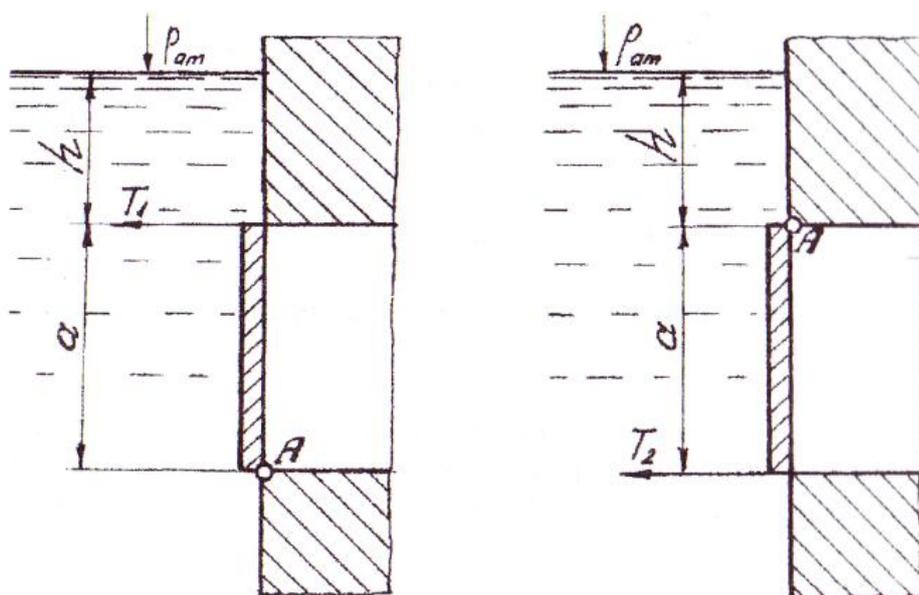


Рис. 2.3.5. Схема к определению силы давления воды на прямоугольный затвор

Таблица 2.3.5

№ варианта	a , м	b , м	h , м
1	1,0	2,0	0,5
2	1,8	1,0	2,0
3	0,5	1,0	2,0
4	2,0	1,8	1,0
5	2,0	0,5	1,0
6	1,0	2,0	1,8

Задача 2.3.6. Определить силу давления воды на щит и центр давления. Щит прямоугольного сечения шириной b наклонен под углом α к горизонту. Глубина воды перед щитом – h_1 , за щитом – h_2 (рис. 2.3.6).

Расчет выполнить аналитическим способом и проверить графоаналитически. Вычислить начальное подъемное усилие, если коэффициент

трения $f = 0,5$, а относительный вес материала щита $\delta = \frac{\gamma_{\text{д}}}{\gamma} = 1,2$. Толщина щита – e . Превышение (по вертикали) верхней кромки щита над горизонтом перед щитом – a .

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 2.3.6.

Указание. Относительный вес – это отношение удельного веса тела $\gamma_{\text{г}}$ к удельному весу воды γ .

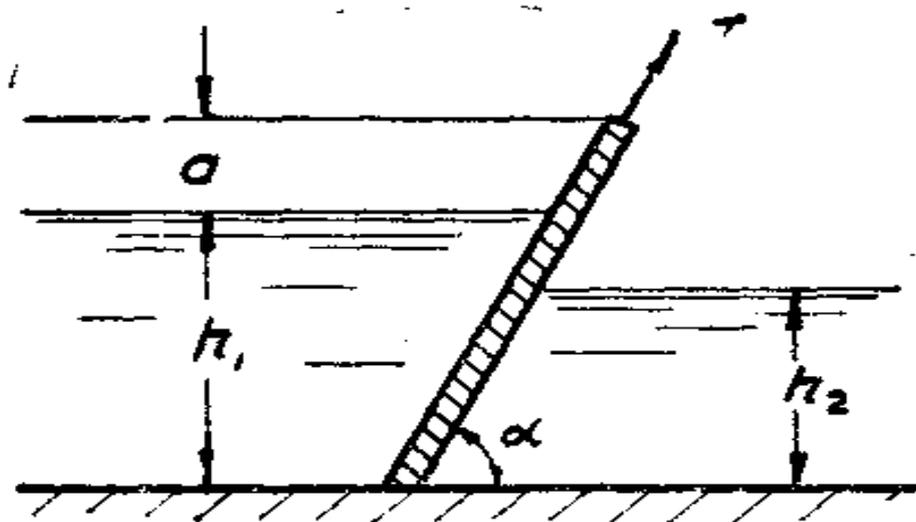


Рис. 2.3.6. К задаче 2.3.6

Таблица 2.3.6

№ варианта	h_1 , м	h_2 , м	b , м	α	a , м	e , м
1	0,9	0,5	1,0	45	0,2	0,06
2	1,2	0,6	1,2	60	0,3	0,06
3	1,5	0,8	1,4	90	0,3	0,06
4	1,8	0,9	1,6	45	0,4	0,08
5	2,1	1,0	1,8	60	0,4	0,08
6	2,4	1,0	2,0	90	0,5	0,08

Задача 2.3.7. Перед клапанным затвором, имеющим плоскую поверхность размером $l \times b$, глубина воды – H (рис. 2.3.7).

Определить силу натяжения троса T , удерживающего затвор в заданном положении (без учета трения в опоре).

Гидравлическую часть задачи решить аналитическим и графоаналитическим методами.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 2.3.7.

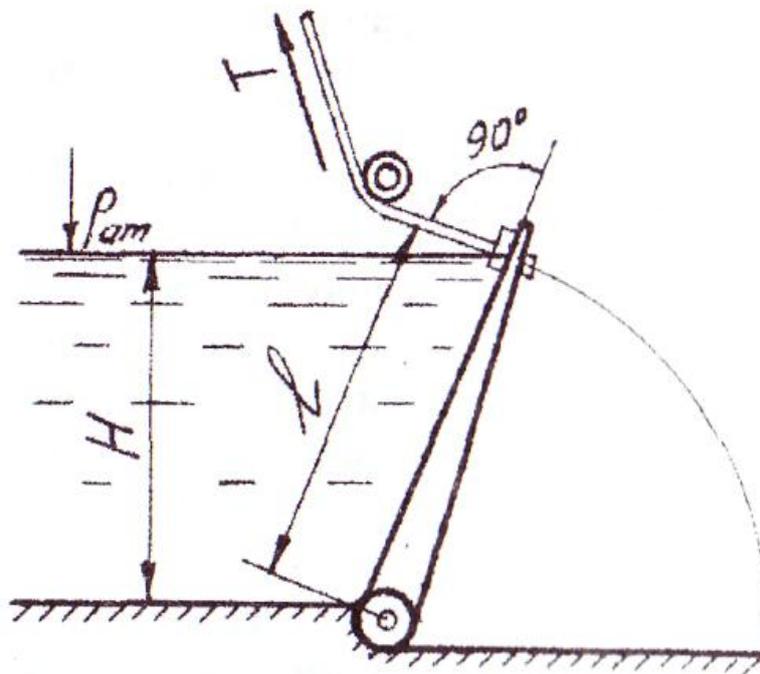


Рис. 2.3.7. К задаче 2.3.7

Таблица 2.3.7

№ варианта	l , м	b , м	H , м
1	2,5	10,0	2,3
2	3,0	6,0	2,4
3	2,3	2,3	1,9
4	2,4	2,4	2,1
5	3,4	3,0	3
6	2,8	2,3	2,5

Задача 2.3.8. Резервуар с нефтью ($\rho_H = 920 \text{ кг/м}^3$) разделен на две части перегородкой, имеющей квадратное отверстие со стороной a (рис. 2.3.8). Гидростатическое давление над нефтью в левой части резервуара, измеряемое пружинным манометром M составляет $P_{ман}$, а в правой – измеряемое вакуумметром B – $P_{вак}$. Определить величину результирующей силы гидростатического давления на крышку, закрывающую отверстие, и координату точки приложения силы.

Указание. Расчет выполнить аналитическим и графоаналитическим способами при данных, приведенных в табл. 2.3.8.

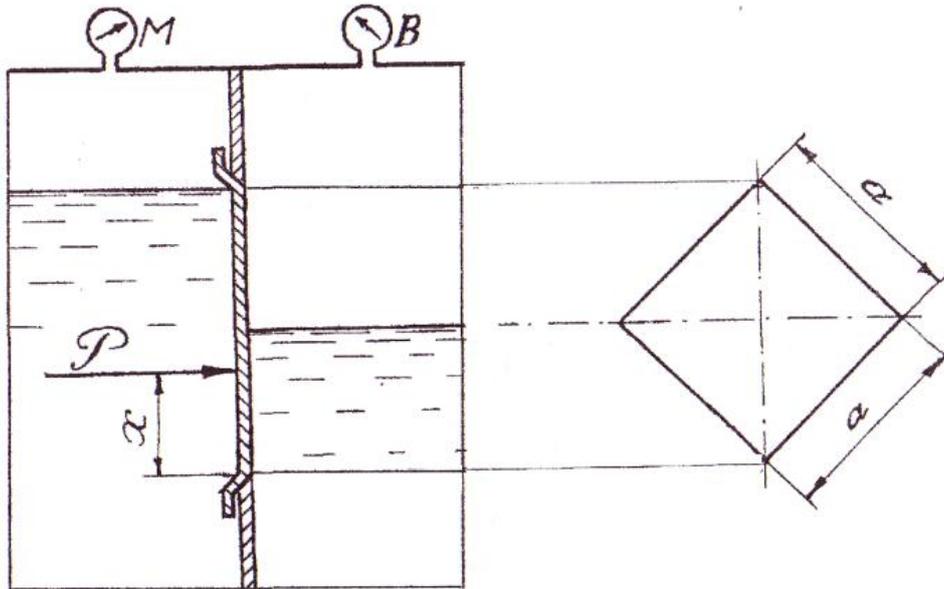


Рис. 2.3.8. Схема к определению силы давления нефти на плоскую вертикальную квадратную крышку

Таблица 2.3.8

№ варианта	a , м	$P_{ман}$, кПа	$P_{вак}$, кПа
1	1,0	15	10
2	1,5	25	30
3	2,0	35	20
4	3,5	45	15
5	4,0	55	25
6	5,0	65	35

Задача 2.3.9. Определить силу давления воды на щит и центр давления. Щит прямоугольного сечения имеет ширину b . Глубина воды перед щитом обозначена как h_1 , а за щитом – как h_2 . Глубина погружения верхней кромки щита – a (рис. 2.3.9). Давление на свободную поверхность воды слева и справа от щита атмосферное. Расчет выполнить аналитическим способом и проверить графоаналитическим.

Вычислить начальное подъемное усилие T , если коэффициент трения $f = 0,5$, а относительный вес материала щита $\delta_\gamma = \frac{\gamma_D}{\gamma} = 1,2$. Толщина щита – e .

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 2.3.9.

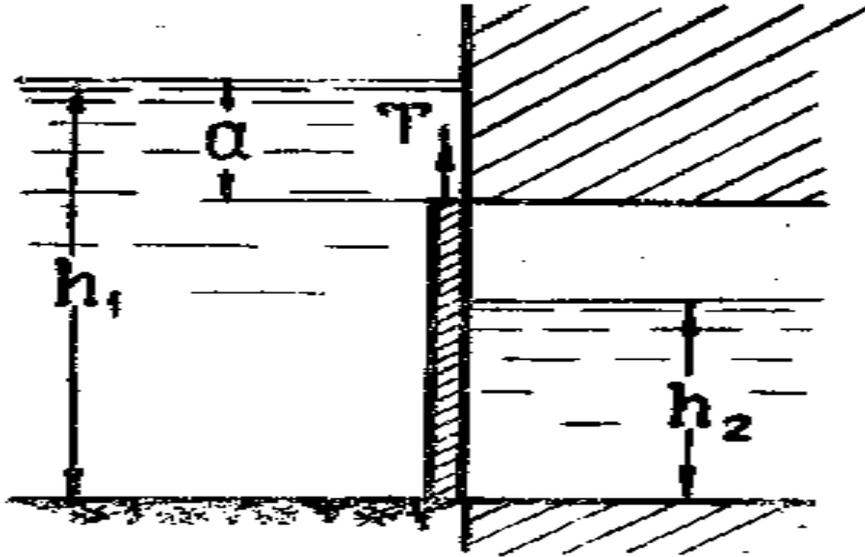


Рис. 2.3.9. К задаче 2.3.9

Таблица 2.3.9

№ варианта	h_1 , м	h_2 , м	a , м	e , м
1	1,0	0,3	0,4	0,06
2	2,0	0,6	0,8	0,06
3	3,0	0,9	1,6	0,06
4	3,5	1,2	1,5	0,08
5	4,0	1,5	2,0	0,08
6	4,5	2,0	2,0	0,08

Задача 2.3.10. Определить силу давления воды на прямоугольный наклонный щит и центр давления. Глубина перед щитом h_1 , за щитом h_2 , ширина щита – b . Угол наклона щита к горизонту $\alpha = 60^\circ$ (рис. 2.3.10).

Расчет выполнить аналитическим и графоаналитическим способами. Найти начальное подъемное усилие исходя из условия, что щит при подъеме вращается вокруг шарнира O , а сила тяги T действует по перпендикуляру к плоскости затвора. Трением в шарнире пренебречь. Превышение шарнира над горизонтом воды перед щитом – a , толщина щита – e . Относительный вес материала, из которого выполнен щит,

$$\delta_\gamma = \frac{\gamma_D}{\gamma} = 1,2.$$

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 2.3.10.

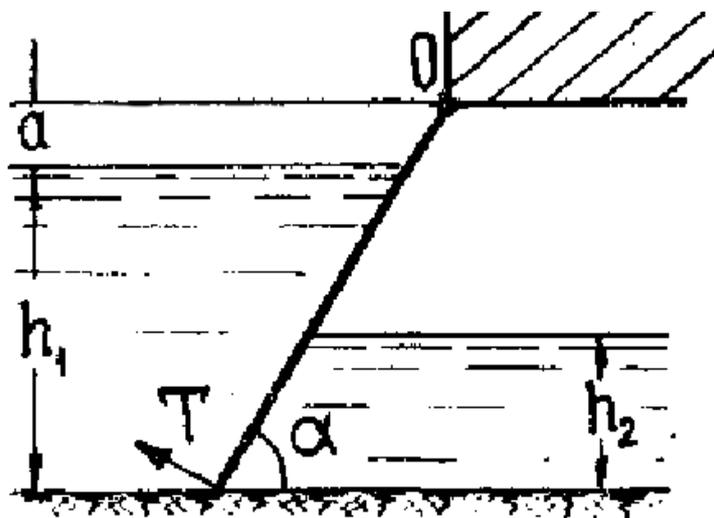


Рис. 2.3.10. К задаче 2.3.10

Таблица 2.3.10

№ варианта	h_1 , м	h_2 , м	b , м	a , м	e , м
1	0,6	0	0,5	0,2	0,06
2	1,0	0,5	0,8	0,3	0,06
3	1,4	0,9	1,2	0,2	0,06
4	1,8	0,6	1,6	0,4	0,08
5	2,0	1,0	2,0	0,5	0,08
6	2,2	0,9	2,1	0,5	0,08

Задача 2.3.11. Определить аналитическим и графоаналитическим способами силы манометрического давления воды на грани AB и BC (рис. 2.3.11), а также центры давления этих сил. Глубина воды в тоннеле – h , высота столба воды над точкой перелома стенки – a , угол наклона $\alpha = 60^\circ$, а $\alpha_2 = 45^\circ$.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 2.3.11 (b – длина тоннеля).

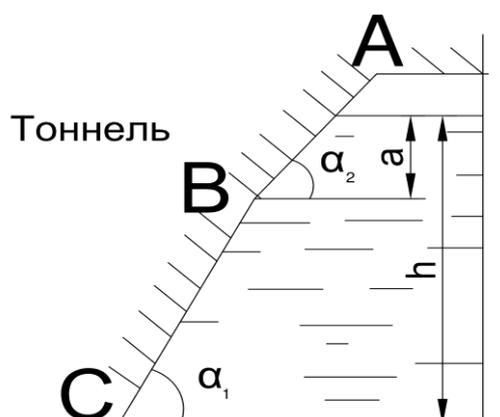


Рис. 2.3.11. К задаче 2.3.11

Таблица 2.3.11

№ варианта	h , м	a , м	b , м
1	1,0	0,3	10
2	1,4	0,5	8
3	1,8	0,6	6
4	2,2	0,8	4
5	2,6	1,0	2
6	3,0	1,2	1

Задача 2.3.12. В резервуар налиты ртуть, вода и масло. Высота слоя масла – h_1 , воды – h_2 , ртути – h_3 . Относительный вес масла $\delta_\gamma = 0,8$, воды $\delta_\gamma = 1$, ртути $\delta_\gamma = 13,6$.

Построить эпюру манометрического давления и вычислить графоаналитическим способом силу давления на боковую прямоугольную стенку резервуара шириной b . Найти центр давления этой силы относительно линии уреза, определив предварительно графоаналитическим способом центры давления составляющих сил P_1 , P_2 и P_3 . Угол наклона стенки – α (рис. 2.3.12). Вычислить манометрическое давление на дне и определить силу давления на дно, а также силу, передаваемую на пол, без учета веса резервуара. Площадь дна резервуара – $b \times b$.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 2.3.12.

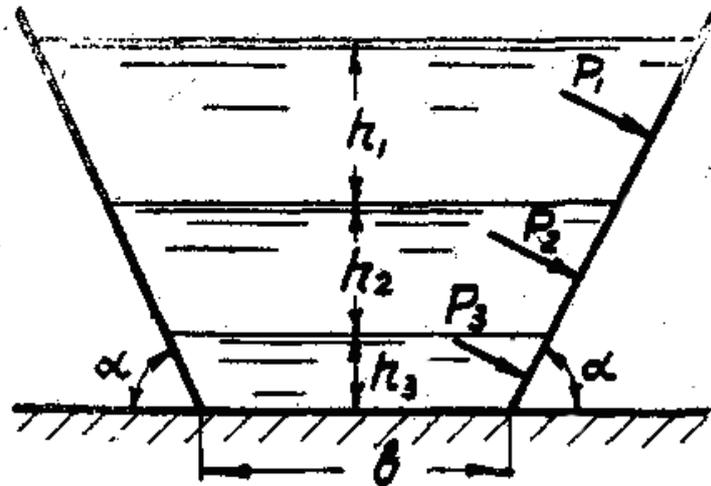


Рис. 2.3.12. К задаче 2.3.12

Таблица 2.3.12

№ варианта	h_1 , м	h_2 , м	h_3 , м	b , м	α°
1	1,0	0,6	0,2	1,6	60
2	0,8	0,6	0,1	1,5	45
3	0,6	0,5	0,05	1,0	45
4	0,5	0,7	0,08	1,2	60
5	0,4	0,6	0,06	1,1	45
6	0,9	0,8	0,15	1,4	60

Задача 2.3.13. Определить аналитическим и графоаналитическим способами силы манометрического давления воды на грани плотины AB , BC и CD , а также центры давления этих сил (рис. 2.3.13). Глубина в верхнем бьефе – h , угол наклона грани CD к горизонту – α_1 , грани AB – α_2 . Ширина бермы – BC , глубина ее погружения – a .

Расчет выполнить на 1 пог. м ширины (вдоль оси плотины) при данных, приведенных в табл. 2.3.13.

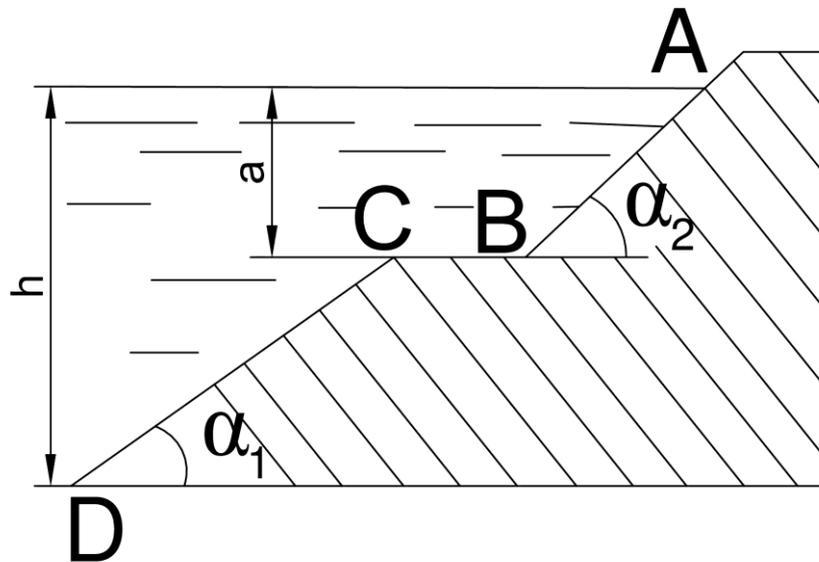


Рис. 2.3.13. К задаче 2.3.13

Таблица 2.3.13

№ варианта	h , м	BC , м	a , м	α_1°	α_2°
1	2,5	0,4	1,0	45	60
2	3,0	0,5	1,5	45	60
3	3,5	0,6	1,5	30	45
4	4,0	0,7	2,0	30	45
5	4,5	0,8	2,0	30	30
6	5,0	0,9	2,5	30	30

Задача 2.3.14. Определить силы давления и центры давления на грани полигональной плоской прямоугольной поверхности, показанной на рис. 2.3.14. Найти равнодействующую и точку приложения равнодействующей.

Расчет выполнить аналитическим и графоаналитическим способами при данных, приведенных в табл. 2.3.14.

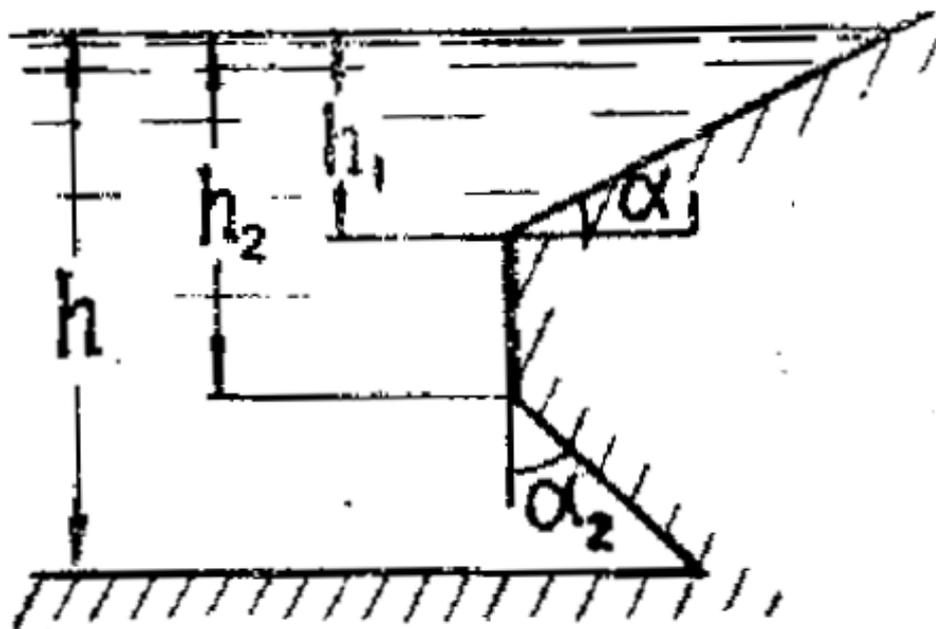


Рис. 2.3.14. К задаче 2.3.14

Таблица 2.3.14

№ варианта	h_1 , м	h_2 , м	h , м	α_1°	α_2°
1	2,0	3,8	5,0	30	45
2	2,3	4,1	5,3	30	45
3	2,4	4,3	5,7	30	45
4	2,8	4,8	6,0	45	60
5	3,1	5,2	6,4	45	60
6	3,4	5,6	6,8	45	60

Задача 2.3.15. Определить силу натяжения троса, удерживающего наклонный прямоугольный щит, если ширина щита b , глубина воды перед щитом h , угол наклона α (рис. 2.3.15).

Найти точку приложения силы давления воды.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 2.3.15.

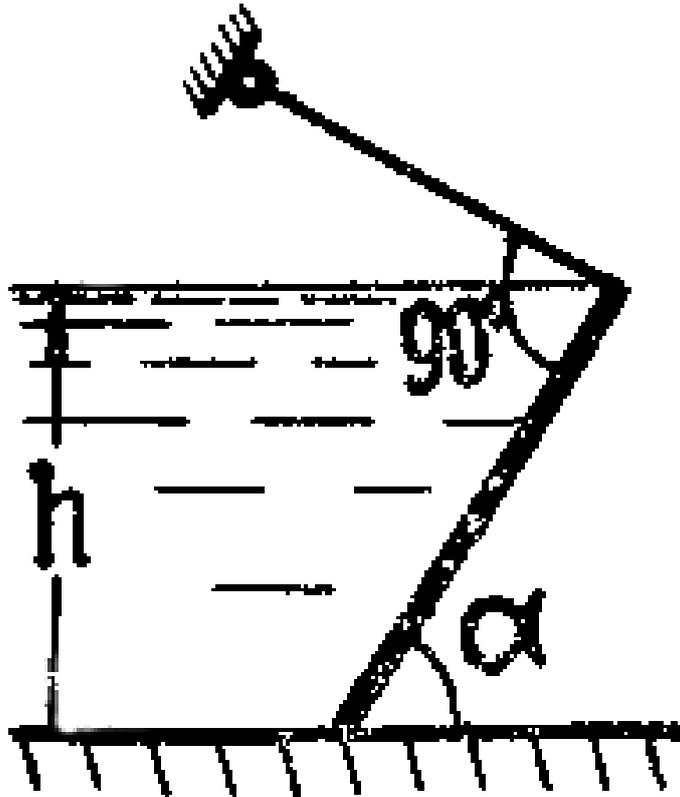


Рис. 2.3.15. К задаче 2.3.15

Таблица 2.3.15

№ варианта	h , м	b , м	α°
1	2,0	1,8	30
2	2,4	2,0	40
3	2,8	2,5	50
4	3,2	3,0	60
5	3,6	3,5	60
6	4,0	4,0	70

3. СИЛА ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА КРИВОЛИНЕЙНЫЕ СИММЕТРИЧНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОСТОЯННОЙ КРИВИЗНЫ

3.1. Основные теоретические положения и расчетные зависимости

Для криволинейных поверхностей постоянной кривизны, симметричных относительно вертикальной плоскости, сумма элементарных сил гидростатического давления приводится к одной равнодействующей силе, лежащей в плоскости симметрии, или к паре сил, лежащей в той же плоскости. В инженерной практике чаще всего встречаются именно такие криволинейные поверхности, в частности цилиндрические, сферические и конические.

Рассмотрим герметично закрытый резервуар, частично заполненный жидкостью и находящийся под манометрическим давлением (рис. 3.1.1). Снаружи резервуара действует атмосферное давление.

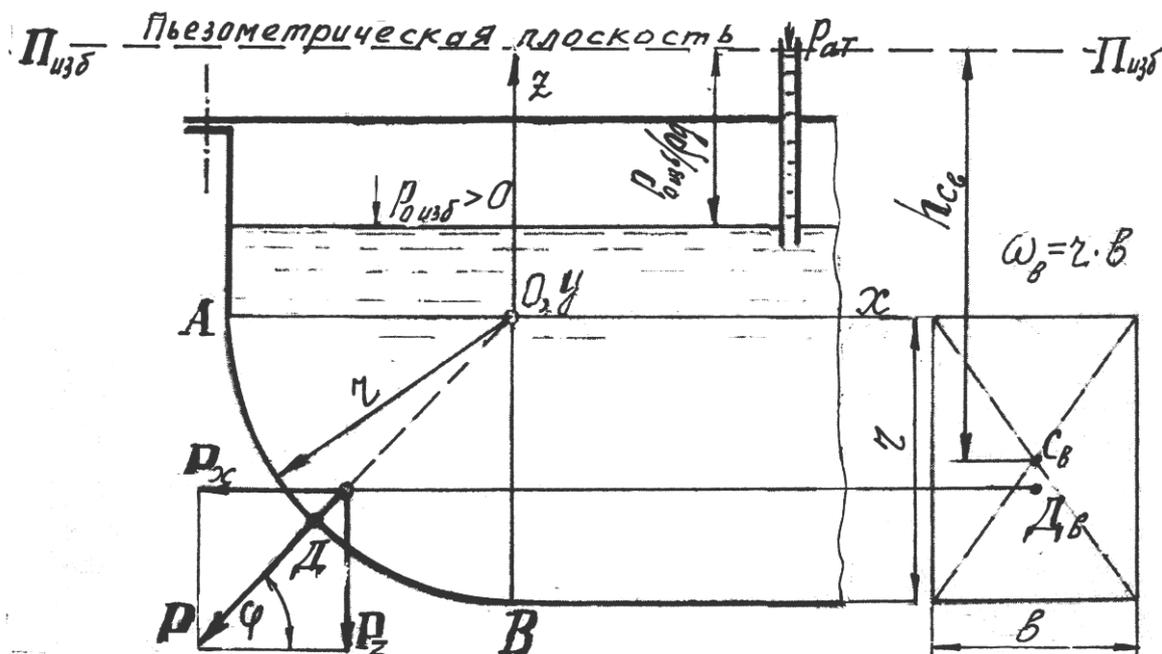


Рис. 3.1.1. К определению горизонтальной P_x и вертикальной P_z составляющих равнодействующей силы P гидростатического давления на цилиндрическую поверхность

Рассмотрим определение равнодействующей силы P избыточного гидростатического давления на цилиндрическую поверхность AB , представляющую собой четверть боковой поверхности цилиндра радиусом

r с горизонтальными образующими (рис. 3.1.2). Для этого частного случая линия действия силы P составляет угол φ с горизонтом и совпадает с направлением радиуса r цилиндрической поверхности (то же самое имеем и в случае сферической поверхности), так как гидростатическое давление в различных точках цилиндрической поверхности направлено по радиусу r кривизны в соответствии с первым свойством гидростатического давления.

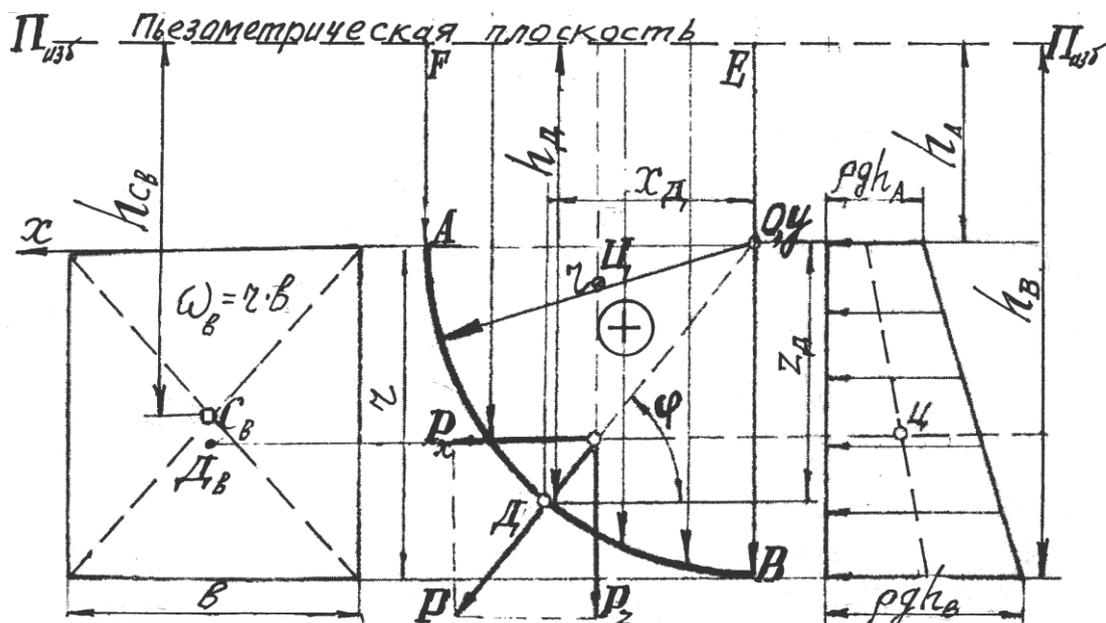


Рис. 3.1.2. К определению силы давления P на криволинейную цилиндрическую поверхность

Очевидно, силу P можно разложить на две составляющие – горизонтальную P_x и вертикальную P_z (см. рис. 3.1.2). Следовательно, сила P является геометрической суммой ее составляющих P_x и P_z :

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}. \quad (3.1)$$

Горизонтальная составляющая P_x силы P представляет собой силу избыточного гидростатического давления на вертикальную проекцию криволинейной поверхности.

Для рассматриваемого случая вертикальная проекция является прямоугольником с высотой, равной r , и шириной b (длина образующей), площадью $\omega = br$.

Величину горизонтальной составляющей вычисляют по формуле

$$P_x = \rho g h_{C_0} \omega, \quad (3.2)$$

где h_{C_0} – расстояние по вертикали от центра тяжести C_0 площади ω до пьезометрической плоскости (см. рис. 3.1.2).

Формула (3.2) идентична формуле (2.3), следовательно, сила P_x численно равна силе избыточного гидростатического давления на воображаемую плоскую вертикальную стенку, площадь которой равна ω .

Если ω_e – прямоугольник, силу P_x можно определить и графо-аналитическим методом, т. е. через площадь Ω эпюры избыточного гидростатического давления, построенной для вертикальной проекции криволинейной поверхности (см. рис. 3.1.2).

Линия действия силы P_x проходит через центр тяжести C площади Ω эпюры и центр давления D_e вертикальной проекции ω_e .

В этом случае вертикальная составляющая P_z представляет собой силу избыточного гидростатического давления на горизонтальную проекцию криволинейной поверхности и равна весу жидкости в объеме тела давления:

$$P_z = \rho g W. \quad (3.3)$$

Объем тела давления W – это объем, заключенный между криволинейной поверхностью и ее проекцией на пьезометрическую плоскость (см. рис. 3.1.2). Для рассматриваемого нами частного случая объем тела давления складывается из двух объемов (четверти объема цилиндра, а именно $\frac{1}{4} W_{\text{Ц}} = \frac{\pi r^2}{4b}$, и объема прямоугольного параллелепипеда высотой h_A при площади rb , $W_{\text{П}} = h_A rb$).

Линия действия вертикальной составляющей P_z проходит через центр тяжести C объема тела давления и направлена в нашем случае вниз, так как тело давления примыкает к смачиваемой жидкостью внутренней стороне криволинейной стенки (см. рис. 3.1.2).

Если тело давления примыкает к внешней (сухой) стороне криволинейной стенки, сила P_z направлена вверх (рис. 3.1.3, криволинейная поверхность KL). В первом случае тело давления называют реальным (положительным, нагружающим), во втором – фиктивным (отрицательным, разгружающим).

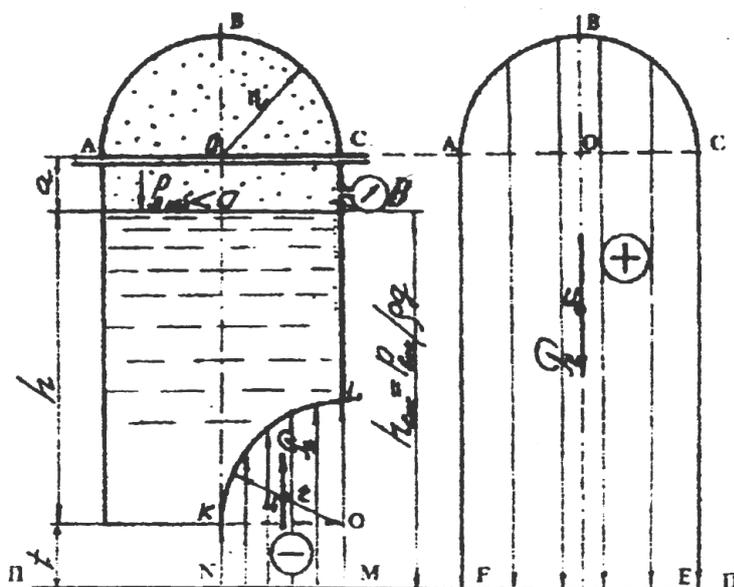


Рис. 3.1.3. К понятию объема тела давления

Линия действия равнодействующей силы P проходит через точку пересечения линий действия ее составляющих P_x и P_z (см. рис. 3.1.2).

Угол φ наклона равнодействующей силы P к горизонту, определяющий линию ее действия, вычисляют из формулы

$$\operatorname{tg}\varphi = P_z / P_x. \quad (3.4)$$

Когда начало координат O совмещено с центром кривизны криволинейной поверхности, координаты центра давления D вычисляют по формулам:

$$x_D = r \cdot \cos\varphi; \quad (3.5)$$

$$z_D = r \cdot \sin\varphi. \quad (3.6)$$

3.2. Примеры решения задач

Задача 3.2.1. Секторный затвор OAB (рис. 3.2.1) радиусом $r = 3,0$ м перекрывает прямоугольное отверстие высотой $a = 2,1$ м и шириной $b = 4,0$ м. Глубина воды перед затвором $H = 5,0$ м. Превышение шарнира O над дном канала $z = 2,5$ м.

Определить величину равнодействующей силы P давления воды на цилиндрическую поверхность ADB затвора, угол наклона φ линии действия силы P к горизонту и координаты x_D и z_D центра давления D . Задачу решить аналитическим и графоаналитическим методами.

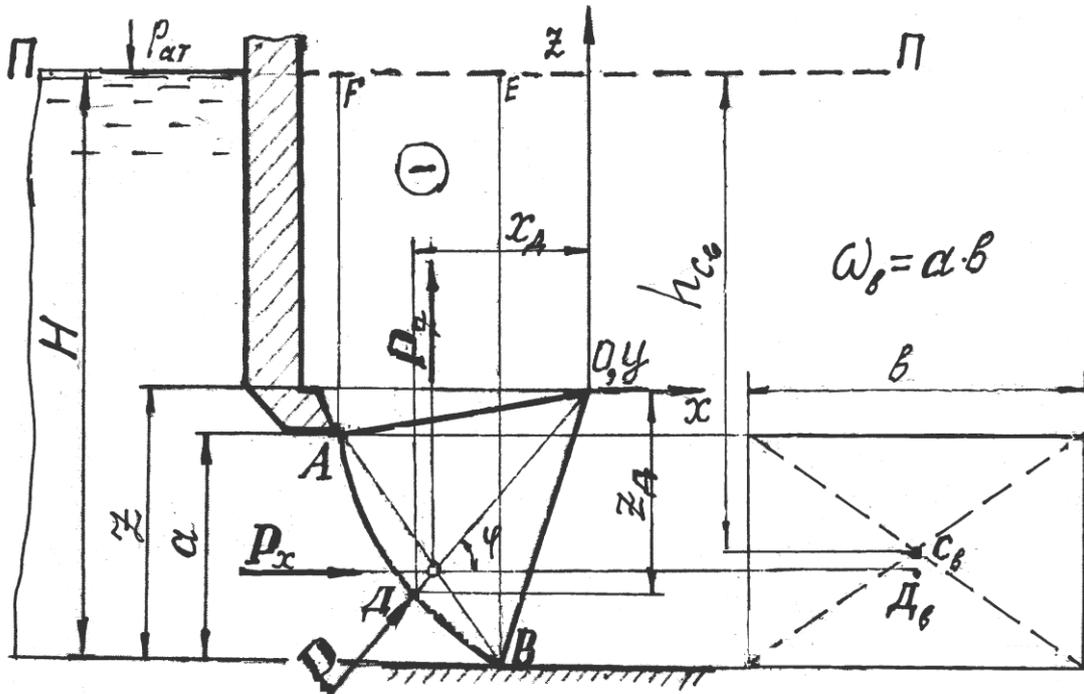


Рис. 3.2.1. Расчетная схема к определению силы P давления воды на цилиндрическую поверхность AB

Аналитическое решение. Величину силы P вычисляем по формуле (3.1), а входящие в нее горизонтальную P_x и вертикальную P_z составляющие – по формулам (3.2) и (3.3) соответственно.

Сила P_x в случае цилиндрической поверхности представляет собой силу давления жидкости на вертикальную прямоугольную стенку, площадь ω_6 которой для условий нашей задачи

$$\omega_6 = ab = 2,1 \cdot 4,0 = 8,4 \text{ м}^2.$$

Гидростатическое давление p_{C_6} в центре ее тяжести C_6

$$\begin{aligned} p_{C_6} = \rho gh_{C_6} &= \rho g(H - 0,5a) = 1000 \cdot 9,81 \cdot (5,0 - 0,5 \cdot 2,1) = \\ &= 38700 \text{ Па} = 38,70 \text{ кПа}. \end{aligned}$$

Таким образом, горизонтальная составляющая

$$P_x = p_{C_6} \omega_6 = 38,70 \cdot 8,4 = 325,0 \text{ кН}.$$

Вертикальная составляющая, как видно из формулы (3.3), численно равна весу жидкости в объеме тела давления W . В нашем случае тело давления $W =$ площади $ADBEF \cdot b$ (см. рис. 3.2.1) пристроено к наружной (сухой) стороне цилиндрической поверхности, следовательно, является фиктивным (отрицательным, разгружающим), поэтому сила P_z направлена вверх.

Для определения объема W разобьем площадь $ADBEF$ на простые геометрические фигуры, проведя хорду AB (см. рис. 3.2.1). Рассмотрим площадь $ADBEF$, состоящую из площади трапеции $ABEF$ и сегмента $ADBA$. Площадь последнего определим как разность площадей сектора $OADB$ и равнобедренного треугольника OAB . В итоге объем $W =$ площади $ADBEF \cdot b = 5,53 \cdot 4,0 = 22,12 \text{ м}^3$, а сила $P_z = \rho gW =$ $= 1000 \cdot 9,81 \cdot 22,12 = 217000 \text{ Н} = 217 \text{ кН}$.

Вычислим по формуле (3.1) равнодействующую силу P давления воды на затвор:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} = \sqrt{325^2 + 217^2} = 390 \text{ кН}.$$

Найдем угол φ наклона линии действия силы P к горизонту через его тангенс, воспользовавшись формулой (3.4):

$$\operatorname{tg} \varphi = P_z / P_x = 217 / 325 = 0,67 \Rightarrow \varphi = 33,75^\circ.$$

Линия действия силы P пройдет через центр кривизны цилиндрической поверхности, т. е. через центр окружности O под углом $\varphi = 33,75^\circ$ к горизонту, поскольку в любой точке цилиндрической поверхности гидростатическое давление действует в радиальном направлении. Приняв за начало координат центр кривизны O цилиндрической поверхности, вычислим координаты x_D и z_D центра давления D по формулам (3.5) и (3.6) и получим:

$$|x_D| = r \cdot \cos \varphi = 3 \cdot 0,83 = 2,49 \text{ м};$$

$$|z_D| = r \cdot \sin \varphi = 3 \cdot 0,56 = 1,67 \text{ м}.$$

Графоаналитическое решение. Величину горизонтальной составляющей силы P_x и линию ее действия определим аналогично графоаналитическому решению задачи 2.2.5. Построим эпюру гидростатического давления на вертикальную проекцию ω_6 цилиндрической поверхности, т. е. на вертикальную прямоугольную стенку высотой $a = 2,1$ м и шириной $b = 4,0$ м, для чего предварительно определим избыточное гидростатическое давление в точках A и B затвора:

$$p_{Aизб} = \rho g(H - a) = 1000 \cdot 9,81 \cdot (5,0 - 2,1) = 28400 \text{ Па} = 28,4 \text{ кПа};$$

$$p_{Bизб} = \rho gH = 1000 \cdot 9,81 \cdot 5,0 = 49000 \text{ Па} = 49,0 \text{ кПа}.$$

Вычертим в масштабе 1:50 секторный затвор и его вертикальную проекцию (рис. 3.2.2). Приняв масштаб для давления в 1 см – 10 кПа, построим эпюру на вертикальную проекцию $\omega_6 = a \cdot b$ (трапеция $KLMN$ на рис. 3.2.2) и найдем графически центр ее тяжести C . Проведем через точку C эпюры горизонтальную линию, которая будет линией действия силы P_x .

Величину силы P_x определим через площадь Ω эпюры гидростатического давления по формуле (2.5):

$$\Omega = [(p_{Aизб} + p_{Bизб}) / 2] \cdot a = [(28,4 + 49,0) / 2] \cdot 2,1 = 81,25 \text{ кН/м};$$

$$P_x = \Omega b = 81,25 \cdot 4,0 = 325,0 \text{ кН}.$$

Величину вертикальной составляющей P_z вычислим по формуле (3.3). Для нахождения объема тела давления W площадь его сечения (в нашем случае площадь $ADBEF$) определяется палеткой (прозрачная пластиной, разбитой на мелкие квадраты; служит для определения площадей на картах и планах). Эта площадь оказалась равной $5,4 \text{ м}^2$.

$$P_z = \rho gW = 1000 \cdot 9,81 \cdot 5,4 \cdot 4,0 = 2120000 \text{ Н} = 212 \text{ кН}.$$

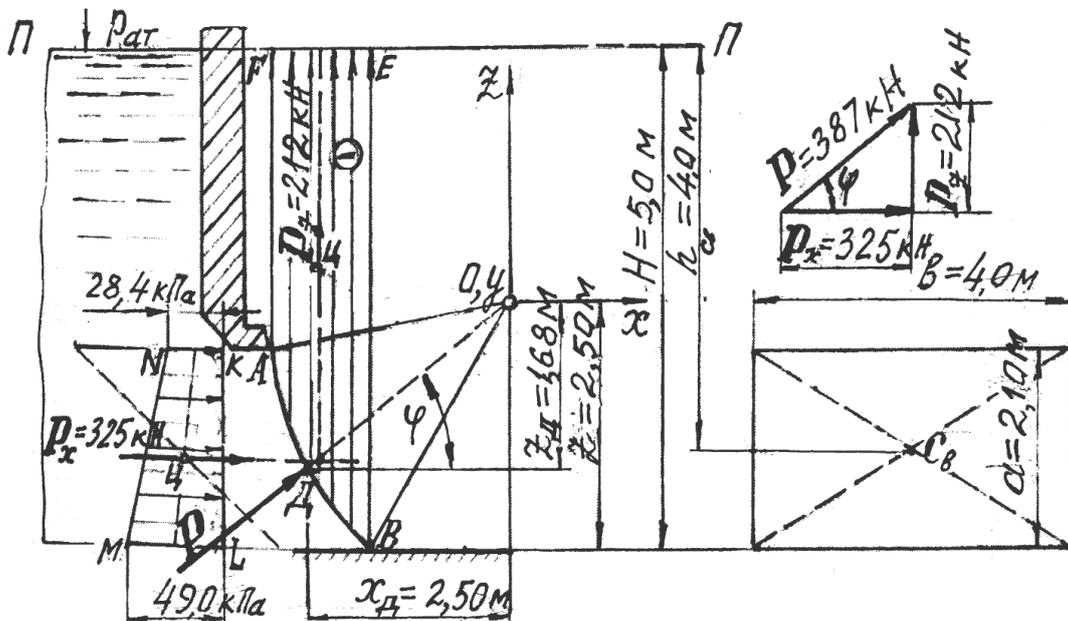


Рис. 3.2.2. Определение равнодействующей силы P давления воды на цилиндрическую поверхность AB графоаналитическим методом

Поскольку линия действия силы P_z проходит через центр тяжести C объема W , а следовательно, и площади $ADBEF$, находим графически положение этого центра как точку пересечения линий, соединяющих центры тяжести вертикальных и горизонтальных площадок, на которые разбита площадь $ADBEF$ (на рис. 3.2.2 показаны только вертикальные площадки и линия, соединяющая центры их тяжести; горизонтальные площадки не показаны, чтобы излишне не затемнять чертеж).

Величину равнодействующей силы P и угол φ наклона линии ее действия к горизонту находим построением треугольника сил, приняв масштаб в 1 см – 50 кН (см. рис. 3.2.2).

Измерив длину диагонали треугольника сил и умножив ее на масштаб сил, получим $P = 387,0$ кН.

Для определения графическим методом центра давления D проводим на чертеже (см. рис. 3.2.2) линию через центр кривизны O затвора параллельно вектору силы P в треугольнике сил. Точка пересечения этой линии с криволинейной поверхностью AB затвора и будет центром давления D . Координаты x_D и z_D определяем по чертежу и получаем $x_D = 2,5$ м, $z_D = 1,68$ м (см. рис. 3.2.2).

Сравнение величин P_x , P_z , P , x_D , z_D , полученных аналитическим и графоаналитическим методами, показывает, что расхождения не превышают 5 %.

Правильность наших вычислений и построений подтверждает и то, что линии действия сил P_x , P_z и P пересекаются в одной точке (см. рис. 3.2.2).

Задача 3.2.2. Определить величину силы P давления воды на секторный затвор (рис. 3.2.3), направление ее действия и координаты x_D и z_D центра давления при следующих данных: $H = 2,0$ м, угол $\alpha = 60^\circ$; ширина пролета, перекрываемого затвором, $b = 4,0$ м.

Решить задачу аналитически и проверить графоаналитически.

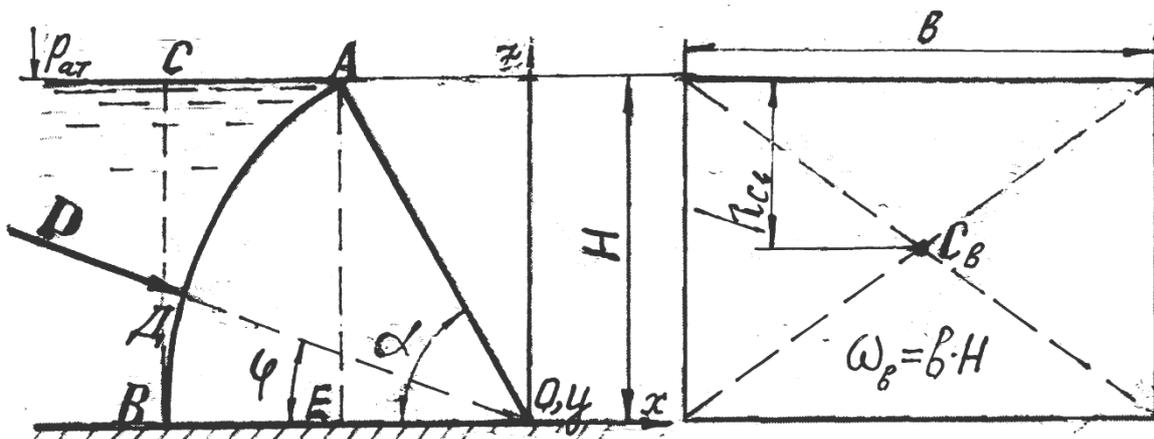


Рис. 3.2.3. Расчетная схема к определению силы давления P воды на секторный затвор AB

Аналитическое решение. Величину силы давления воды P на затвор AB , являющийся цилиндрической поверхностью, вычислим по формуле (3.1), для чего предварительно необходимо найти горизонтальную P_x и вертикальную P_z составляющие этой силы.

Горизонтальную составляющую P_x , равную силе давления воды на вертикальную проекцию затвора AB , определим по формуле (3.2). Площадь вертикальной проекции затвора в данном случае $\omega_g = H \cdot b$.

$$P_x = \rho g h_{C_6} \omega = (\rho g H / 2) \cdot H \cdot b = \frac{1}{2} \rho g H^2 b = 1/2 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 2^2 \cdot 4 = 78500 \text{ Н} = 78,5 \text{ кН.}$$

Вертикальную составляющую P_z , равную весу жидкости в объеме W тела давления, вычислим по формуле (3.3).

В условиях данной задачи объем тела давления $W = \text{площадь } ABC \cdot b$ найдем как разность объемов $W_1 = \text{площадь } ACBE \cdot b$ и $W_2 = \text{площадь } AEO \cdot b = (\text{площадь } OAB - \text{площадь } OAE) \cdot b$ (см. рис. 3.1.6):

$$W_1 = \text{площадь } ACBE \cdot b = H (H / \sin \alpha - H \cdot \text{ctg} \alpha) \cdot b = 2 \cdot (2 / 0,867 - 2 \cdot 0,578) \cdot 4 = 9,28 \text{ м}^3.$$

$$W_2 = (\text{площадь } OAB - \text{площадь } OEA) \cdot b =$$

$$= \left(\frac{\pi H^2 \alpha}{\sin^2 \alpha \cdot 360} - \frac{1}{2} H \cdot H \cdot \text{ctg} \alpha \right) \cdot b =$$

$$= \left(\frac{3,14 \cdot 2^2 \cdot 60}{0,867^2 \cdot 360} - \frac{1}{2} 2 \cdot 2 \cdot 0,578 \right) \cdot 4 = (2,78 - 1,15) \cdot 4 = 6,52 \text{ м}^3;$$

$$W = W_1 - W_2 = 9,28 - 6,52 = 2,76 \text{ м}^3;$$

$$P_z = \rho g W = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2,76 = 27100 \text{ Н} = 27,1 \text{ кН.}$$

Тело давления объемом W реальное, так как соприкасается со смоченной поверхностью затвора AB , поэтому сила P_z будет направлена вниз. Величина силы давления воды на секторный затвор, согласно формуле (3.1):

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} = \sqrt{78,5^2 + 27,1^2} = 83,0 \text{ кН.}$$

Координаты центра давления вычислим по формулам (3.5) и (3.6), в которые входит угол φ наклона линии действия силы P к горизонту, поэтому предварительно найдем тангенс этого угла по формуле (3.4), а затем и сам угол φ :

$$\text{tg} \varphi = P_z / P_x = 27,1 / 78,5 = 0,355 \Rightarrow \varphi = 19^\circ 32';$$

$$X_D = r \cdot \cos \varphi = (H / \sin \varphi) \cdot \cos \varphi = (2 / 0,867) \cdot 0,965 = 2,23 \text{ м};$$

$$Z_D = r \cdot \sin \varphi = (H / \sin \varphi) \cdot \sin \varphi = (2 / 0,867) \cdot 0,335 = 0,77 \text{ м.}$$

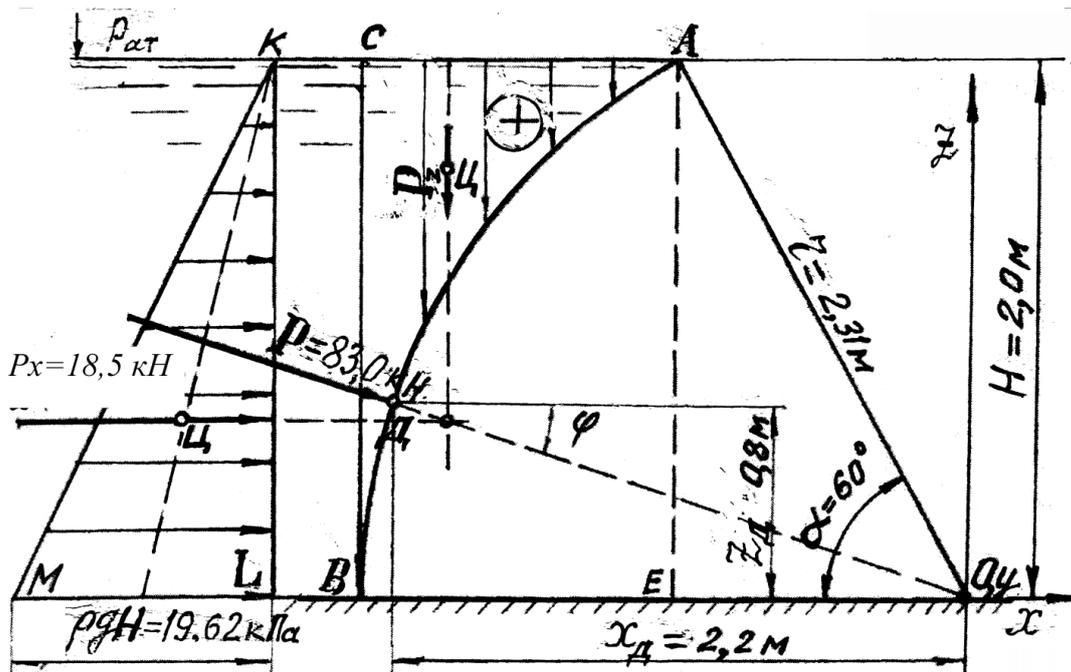
Для графоаналитической проверки аналитического решения выполним в масштабе чертеж секторного затвора (рис. 3.2.4). Затем найдем графоаналитически силу P_x . Предварительно построим эпюру гидростатического давления для вертикальной проекции затвора AB .

Эпюра представляет собой треугольник KLM (рис. 3.2.4). Умножив площадь Ω эпюры KLM на ширину затвора b (согласно формуле (2.5)), получим величину горизонтальной составляющей P_x :

$$P_x = \Omega b = \text{площадь } KLM \cdot b = \rho g H^2 / (2 \cdot b) = \\ = (1000 \cdot 9,81 \cdot 2^2) / (2 \cdot 4) = 78500 \text{ Н} = 78,5 \text{ кН}.$$

Далее найдем объем тела давления $W = \text{площадь } ABC \cdot b$, причем площадь ABC определим графически, после чего вычислим величину вертикальной составляющей P_z :

$$P_z = \rho g \cdot \text{площадь } ABC \cdot b = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,4 \cdot 2,0 = 27500 \text{ Н} = 27,5 \text{ кН}.$$



Силовой треугольник

Масштабы
для расстояний 1 : 25;
для давления в 1 см : 5 кПа
для сил 1 см : 20 кН

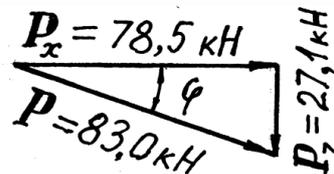


Рис. 3.2.4. К определению силы P на затвор AB графоаналитически

Для нахождения величины и направления силы P графическим методом построим в масштабе для составляющих P_x и P_z треугольник сил (см. рис. 3.2.4), из которого получим величину силы $P = 83,0$ кН и ее направление, характеризуемое углом φ .

Чтобы найти графически центр давления D силы P , проведем на чертеже (см. рис. 3.2.4) через центр кривизны O прямую, параллельную вектору силы P в силовом треугольнике. Точка встречи этой прямой с затвором AB и будет центром давления D .

Координаты X_D и Z_D центра давления определим по чертежу затвора.

Для контроля правильности геометрических построений и вычислений нанесем на чертеж линии действия составляющих P_x и P_z , для чего предварительно найдем центры тяжести площадей KLM и ABC , через которые должны пройти линии действия этих составляющих. При правильно выполненных геометрических построениях и вычислениях точка пересечения линий действия сил P_x и P_z должна лежать на линии действия силы P , т. е. линии действия сил P_x , P_z и P должны пересечься в одной точке, что и видно на рис. 3.2.4.

Задача 3.2.3. Герметично закрытый вертикальный цилиндрический резервуар диаметром $d = 2,0$ м, крышка ABC и дно EFK которого представляют собой полусферические поверхности, целиком заполнен водой (рис. 3.2.5). Высота цилиндрической части резервуара $h = 2,5$ м. К верхней точке крышки ABC подключен пружинный манометр, показывающий давление $p_{ман} = 98,1$ кПа. Снаружи резервуара давление атмосферное.

Определить:

а) силы, которые стремятся оторвать крышку ABC и дно EFK от цилиндра;

б) силу, стремящуюся разорвать цилиндрическую часть резервуара по образующей, аналитическим и графоаналитическим методами.

Решение. Силами, отрывающими крышку и дно от резервуара, являются вертикальные составляющие P_z и P'_z (рис. 3.2.5). Вычислим их по формуле (3.3).

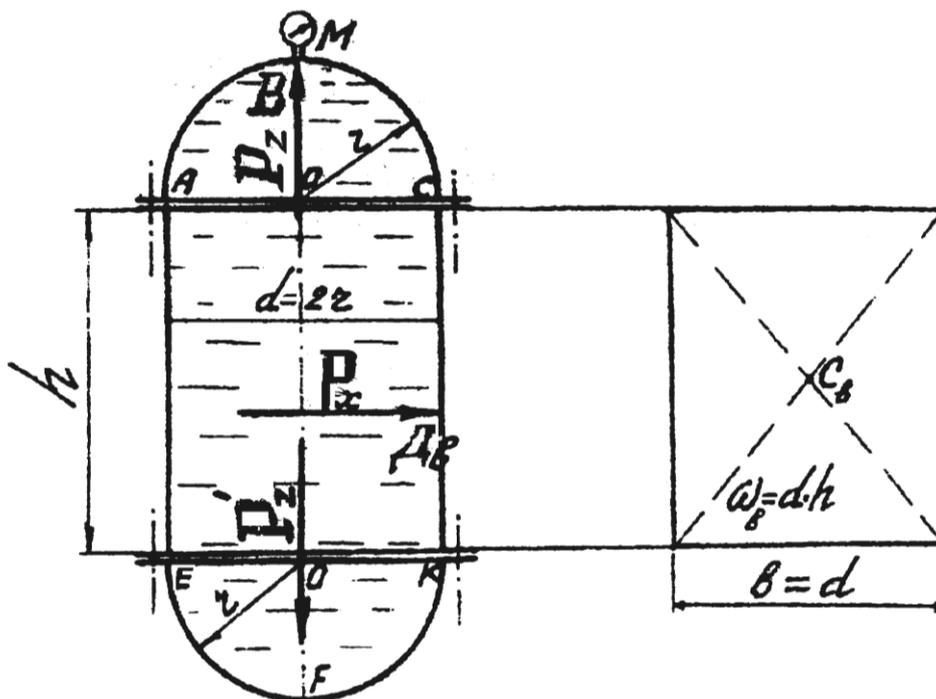


Рис. 3.2.5. К определению сил P_z , P'_z , P_x

Для вычисления величин этих сил найдем соответствующие объемы тел давления W и W' (см. рис. 3.2.5), зная, что объем тела давления – это объем, заключенный между криволинейной поверхностью и пьезометрической плоскостью П-П (рис. 3.2.6). В данном случае плоскость П-П располагается выше точки B крышки на величину $p_{ман} / \rho g = 98100 : 1000 \cdot 9,81 = 10$ м (рис. 3.2.6). Из рис. 3.2.6 следует, что объем тела давления для крышки ABC представляет собой разность между объемом цилиндра высотой $((p_{ман} / \rho g) + r)$ и половиной объема шара $(1/2 \cdot 4/3\pi r^3)$, т. е.

$$\begin{aligned} W &= (p_{ман} / \rho g + r) \cdot \pi r^2 - 1/2 \cdot 4/3\pi r^3 = \\ &= (10 + 1) \cdot 3,14 \cdot 1^2 - 2/3 \cdot 3,14 \cdot 1^3 = 32,44 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

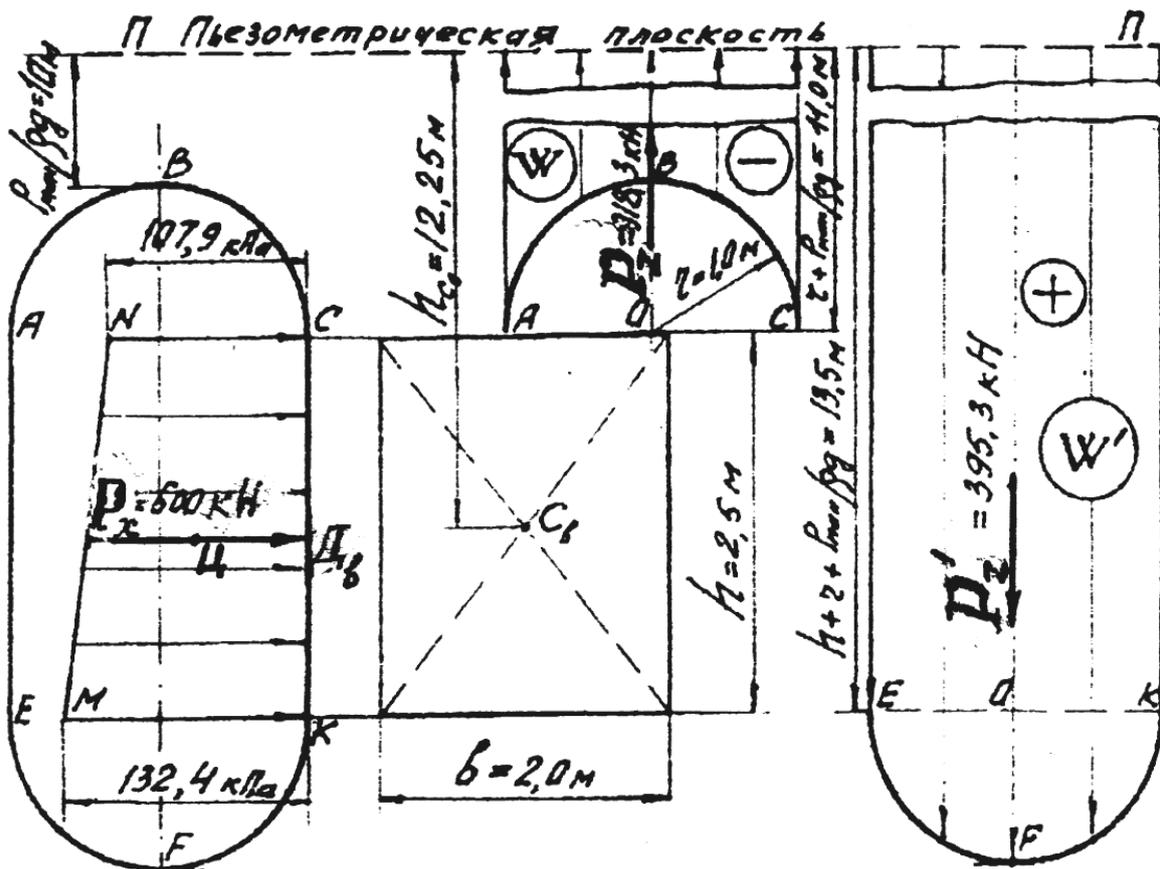


Рис. 3.2.6. К определению силы P_x графоаналитическим методом и нахождению объемов тел давления W и W'

Объем тела давления W' (для дна EFK) представляет собой сумму объема цилиндра высотой $h + r + p_{ман} / \rho g$ и половины объема шара:

$$\begin{aligned} W' &= (h + p_{ман} / \rho g + r) \cdot \pi r^2 + 1/2 \cdot 4/3\pi r^3 = \\ &= (2,5 + 1 + 10) \cdot 3,14 \cdot 1^2 + (2/3) \cdot 3,14 \cdot 1^3 = 44,49 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

Тело давления объемом W фиктивное (отрицательное, разгружающее), так как соприкасается с наружной (сухой) поверхностью крышки ABC , следовательно, сила P_z направлена вверх (см. рис. 3.2.6).

Тело давления объемом W' является реальным (положительным, нагружающим), поскольку соприкасается с обращенной к жидкости, т. е. внутренней (в данном случае смоченной) поверхностью EFK , следовательно, сила P'_z направлена вниз. Поскольку крышка ABC и дно EFK симметричны относительно вертикальной оси, линии действия сил P_z и P'_z совпадают с этой осью (см. рис. 3.2.6).

Вычислим величины сил P_z и P'_z :

$$P_z = \rho g W = 1000 \cdot 9,81 \cdot 32,44 = 318302 \text{ Н} = 318,3 \text{ кН};$$

$$P'_z = \rho g W' = 1000 \cdot 9,81 \cdot 44,49 = 395310 \text{ Н} = 395,3 \text{ кН}.$$

Силой, заставляющей работать цилиндрическую часть резервуара на разрыв, является горизонтальная составляющая P_x , которая представляет собой в данном случае силу давления воды на вертикальную проекцию цилиндрической поверхности высотой h . Площадь этой проекции для условий задачи равна $\omega_\theta = d \cdot h = 2,0 \cdot 2,5 = 5,0 \text{ м}^2$.

При аналитическом методе решения величину P_x вычислим по формуле (3.2):

$$P_x = p_{C_\theta} \cdot \omega_\theta = \rho g h_{C_\theta} \cdot \omega_\theta = \\ = 1000 \cdot 9,81 \cdot 12,15 \cdot 5,0 = 600000 \text{ Н} = 600 \text{ кН},$$

где h_{C_θ} – расстояние по высоте от центра тяжести C_θ площади вертикальной проекции цилиндрической поверхности до пьезометрической плоскости $\Pi-\Pi$ (см. рис. 3.2.6), расположенной выше точки B крышки ABC на величину $p_{\text{ман}}/\rho g = 10 \text{ м}$.

Для определения величины P_x графоаналитическим методом построена эпюра манометрического давления (см. $SKMN$ на рис. 3.2.6) на вертикальную прямоугольную стенку, каковой является вертикальная проекция цилиндрической поверхности (см. рис. 3.2.6). Величину P_x вычислим через площадь Ω эпюры гидростатического давления по формуле (2.5):

$$\Omega = (107,9 + 132,4) \cdot 2,5 / 2 = 240,3 \cdot 2,5 / 2 = 300 \text{ кН/м};$$

$$P_x = \Omega b = 300 \cdot 2,0 = 600 \text{ кН}.$$

Как видим, величины силы P_x , найденные аналитически и графоаналитически, оказались одинаковыми.

Задача 3.2.4. В нижней части вертикальной плоской стенки открытого резервуара (рис. 3.2.7) имеется проем прямоугольной формы шириной $b = 2,0 \text{ м}$, закрытый криволинейной крышкой AB , представляющей собой четверти боковой поверхности цилиндра радиусом $r = 1,0 \text{ м}$. Глубина воды в резервуаре $h = 2,0 \text{ м}$.

Определить величину и направление действия силы P давления воды на крышку, а также координаты x_D и z_D центра давления D этой силы аналитическим и графоаналитическим методами.

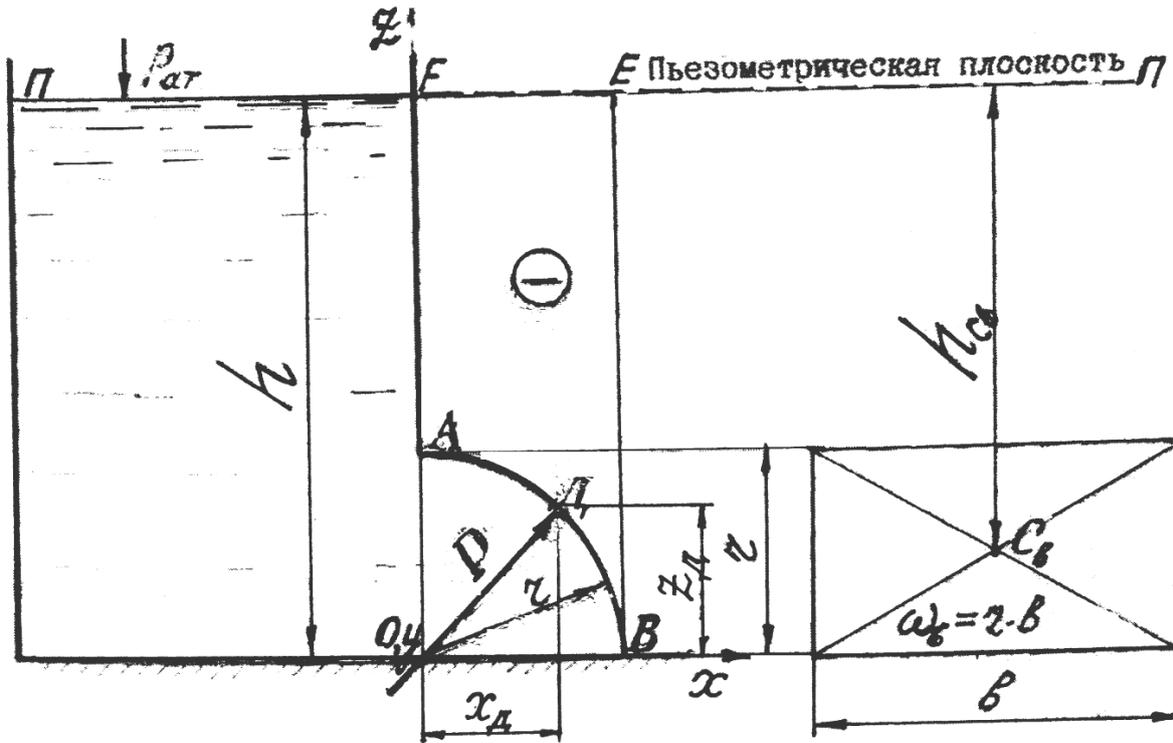


Рис. 3.2.7. Расчетная схема к определению силы P давления воды на цилиндрическую поверхность AB

Аналитическое решение. Равнодействующая сила давления воды P на цилиндрическую крышку AB является геометрической суммой двух составляющих (см. формулу (3.1)) – горизонтальной P_x и вертикальной P_z , поэтому прежде всего найдем эти составляющие, воспользовавшись формулами (3.2) и (3.3).

Горизонтальная составляющая P_x есть сила давления жидкости на воображаемую плоскую вертикальную стенку, являющуюся проекцией цилиндрической поверхности AB на координатную плоскость zOy (см. рис. 3.2.7), т. е. на прямоугольную стенку, площадь которой $\omega_6 = rb$.

$$P_x = \rho g h_{C_6} r b = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,5 \cdot 1,0 \cdot 2,0 = 29430 \text{ Н} = 29,43 \text{ кН.}$$

Вертикальная составляющая P_z численно равна весу жидкости в объеме W тела давления. Объем W найдем, спроектировав поверхность крышки AB на продолжение свободной поверхности жидкости, являющейся одновременно пьезометрической плоскостью $\Pi-\Pi$.

Объем W представляет собой разность между объемом прямоугольного параллелепипеда ($h \cdot r \cdot b$) и четвертью объема цилиндра ($0,25\pi r^2 b$):

$$W = h \cdot r \cdot b - 0,25 \pi r^2 b = r \cdot b (h - 0,25 \pi r).$$

Данное тело давления является фиктивным (разгружающим), так как пристроено к внешней (наружной), т. е. сухой стороне, следовательно, сила P_z направлена вверх и составляет:

$$P_z = \rho g r b (h - 0,25 \pi r) = \\ = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,0 \cdot 2,0 \cdot (2,0 - 0,25 \cdot 3,14 \cdot 1,0) = 23838 \text{ Н} = 23,84 \text{ кН.}$$

Равнодействующая сила P , будучи геометрической суммой P_z и P_x :

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} = \sqrt{29,43^2 + 23,84^2} = 37,87 \text{ кН.}$$

Направление действия силы P , определяемое углом φ наклона вектора силы P к горизонту, найдем через тангенс угла φ по формуле (3.4):

$$\operatorname{tg} \varphi = P_z / P_x = 23,84 / 29,43 = 0,81,$$

откуда $\varphi = 39^\circ$.

Координаты X_D и Z_D центра давления D вычислим по формулам (3.5) и (3.6), приняв за начало координат центр кривизны O крышки AB :

$$x_D = r \cdot \cos \varphi = 1,0 \cdot 0,78 = 0,78 \text{ м;}$$

$$z_D = r \cdot \sin \varphi = 1,0 \cdot 0,63 = 0,63 \text{ м.}$$

Графоаналитическое решение. Начнем с определения составляющих P_x и P_z .

Для определения горизонтальной составляющей P_x построим в масштабе эпюру избыточного гидростатического давления для вертикальной проекции крышки AB , представляющей собой вертикальную прямоугольную стенку высотой r и шириной b (рис. 3.2.8). Умножив площадь эпюры Ω на ширину b стенки (согласно формуле (2.5)), получим величину силы P_{xzp} :

$$P_{xzp} = \Omega \cdot b = \frac{\rho g (h - r) + \rho g h}{2} r b = \frac{\rho g (2h - r)}{2} r b = \\ = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot (2 \cdot 2,0 - 1,0)}{2} 1,0 \cdot 2,0 = 29430 \text{ Н} = 29,43 \text{ кН.}$$

Линию действия силы P_{xzp} найдем как перпендикуляр к вертикальной стенке $\omega_g = r \cdot b$, проведенный через центр тяжести C эпюры гидростатического давления (рис. 3.2.8).

Величину вертикальной составляющей силы P_{zsp} определим через объем W тела давления, который находим по чертежу с использованием палетки для определения площади $ABEF$ (рис. 3.2.8). Эта площадь равна $1,21 \text{ м}^2$.

$$P_{zsp} = \rho g \cdot \text{плоч. } ABEF = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,21 \cdot 2,0 = 23800 \text{ Н} = 23,8 \text{ кН.}$$

Линия действия силы P_{zsp} проходит через центр тяжести объема тела давления, а следовательно, и через центр тяжести площади $ABEF$. Этот центр найден нами графически, т. е. разбивкой площади $ABEF$ на горизонтальные и вертикальные площадки одинаковой ширины.

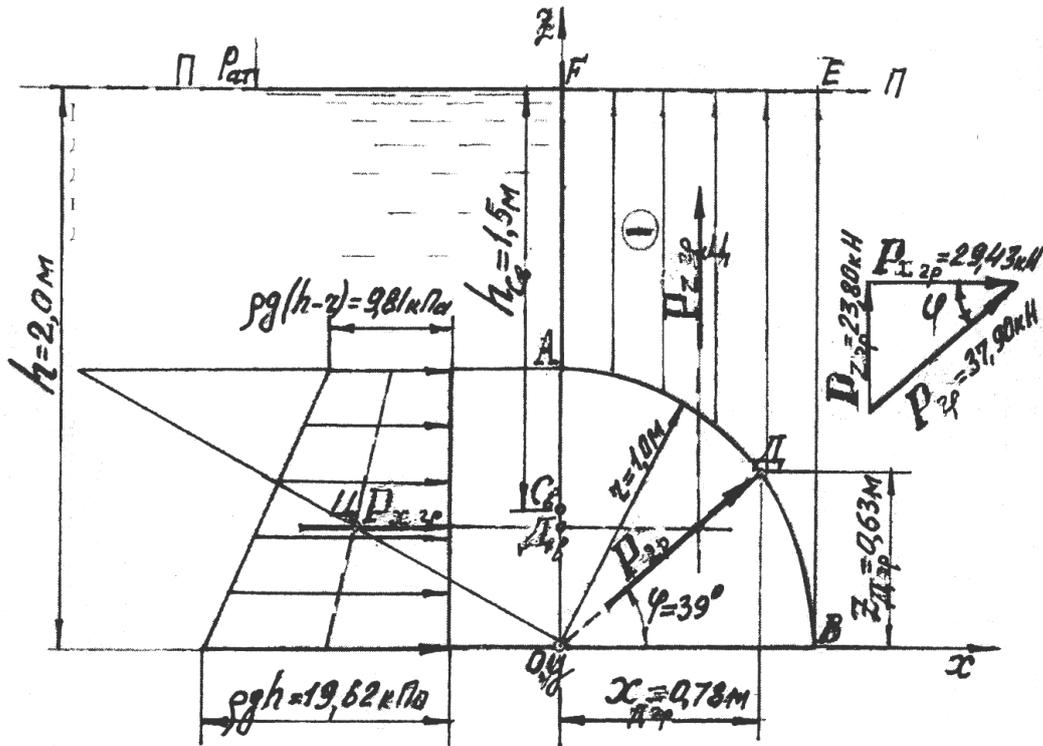


Рис. 3.2.8. Определение равнодействующей силы P давления воды на цилиндрическую крышку AB графоаналитическим методом

Величину равнодействующей силы $P_{гр}$ найдем графически – построением в масштабе треугольника сил (см. рис. 3.2.8). $P_{гр} = 37,90$ кН.

Линию действия силы $P_{гр}$ определяем графически, проведя ее на чертеже (см. рис. 3.2.8) через центр кривизны O крышки AB параллельно вектору силы $P_{гр}$ в треугольнике сил. Точка пересечения этой линии с поверхностью крышки AB является центром давления D , координаты которого $X_{Дгр}$ и $Z_{Дгр}$ определяем по чертежу (см. рис. 3.2.8).

Чтобы убедиться в правильности вычислений и геометрических построений, проверяем на рис. 3.2.8, пересеклись ли в одной точке линии действия сил $P_{Xгр}$, $P_{Zгр}$ и $P_{гр}$, и убеждаемся, что все расчеты и построения правильны. Расхождений в величинах, полученных аналитическим и графоаналитическим методами, нет.

Задача 3.2.5. Определить горизонтальную P_x и вертикальную P_z составляющие равнодействующей силы P давления воды на полусферическую крышку ABC (рис. 3.2.9), закрывающую круглое отверстие диаметром $d = 1$ м, выполненное в вертикальной плоской стенке герметично закрытого резервуара. Глубина воды в резервуаре $h = 2,0$ м. Заглубление центра отверстия под уровень воды $h'_{св} = 1,0$ м. Манометр, подключенный над свободной поверхностью воды, показывает, что $p_{ман} = p_{0изб} = 15,0$ кПа.

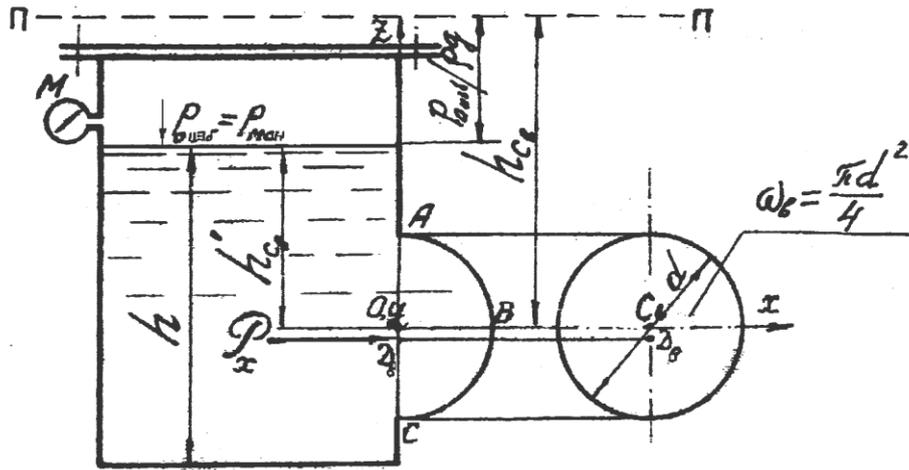


Рис. 3.2.9. Схема к определению горизонтальной составляющей P_x на полусферическую крышку ABC

Решение. Силу P_x вычисляем по формуле (3.2) как силу давления жидкости на воображаемую вертикальную плоскую круглую стенку, являющуюся проекцией полусферической крышки на координатную плоскость zOy :

$$P_x = \rho g h_{C_6} \cdot \omega_6 = \rho g \left(\frac{p_{0изб}}{\rho g} + h'_{C_6} \right) \frac{\pi d^4}{4} =$$

$$= 1000 \cdot 9,81 \left(\frac{15000}{1000 \cdot 9,81} + 1,0 \right) \frac{3,14 \cdot 1,0^4}{4} = 19500 \text{ Н} = 19,5 \text{ кН.}$$

где h_{C_6} – расстояние по высоте от центра тяжести C_6 площади ω_6 до пьезометрической плоскости $\Pi-\Pi$.

Сила P_x будет стремиться оторвать полусферическую крышку от стенки резервуара.

Вертикальную составляющую P_z вычислим по формуле (3.3). Для нахождения объема тела давления W , входящего в формулу (3.3), предварительно разделим полусферическую поверхность ABC горизонтальной плоскостью, проходящей через точку перегиба B , на две части (верхнюю AB и нижнюю BC), найдем для каждой из них объем тела давления, а затем, сложив их алгебраически, получим искомую величину объема тела давления.

Зная, что тело давления представляет собой объем, заключенный между криволинейной поверхностью и ее проекцией на пьезометрическую плоскость, найдем высотное положение плоскости $\Pi-\Pi$. Для этого вычислим пьезометрическую высоту $p_{0изб} / \rho g$, отвечающую внешнему избыточному давлению, которое нам задано (рис. 3.2.10):

$$h_{p_{0изб}} = p_{0изб} / \rho g = 15000 / 1000 \cdot 9,81 = 1,53 \text{ м.}$$

Как видим, пьезометрическая плоскость $\Pi-\Pi$ будет расположена выше уровня воды в резервуаре на 1,53 м.

Спроектировав верхнюю часть AB крышки на эту плоскость, получим фиктивное тело давления W' , так как оно пристроено к наружной (сухой) стороне поверхности AB . Очевидно, вертикальная составляющая P'_z , действующая на верхнюю часть AB крышки, будет направлена вверх (рис. 3.2.10).

Проектируя на пьезометрическую плоскость нижнюю часть BC крышки, получаем реальное тело давления W'' , поскольку оно пристроено к внутренней (в данном случае смоченной) стороне криволинейной поверхности. Следовательно, вертикальная составляющая P''_z , действующая на нижнюю часть BC крышки, будет направлена вниз (рис. 3.2.10). Сложив алгебраически объемы W' и W'' (в данном случае вычитая из большего объема меньший), получим объем W тела давления для всей крышки ABC .

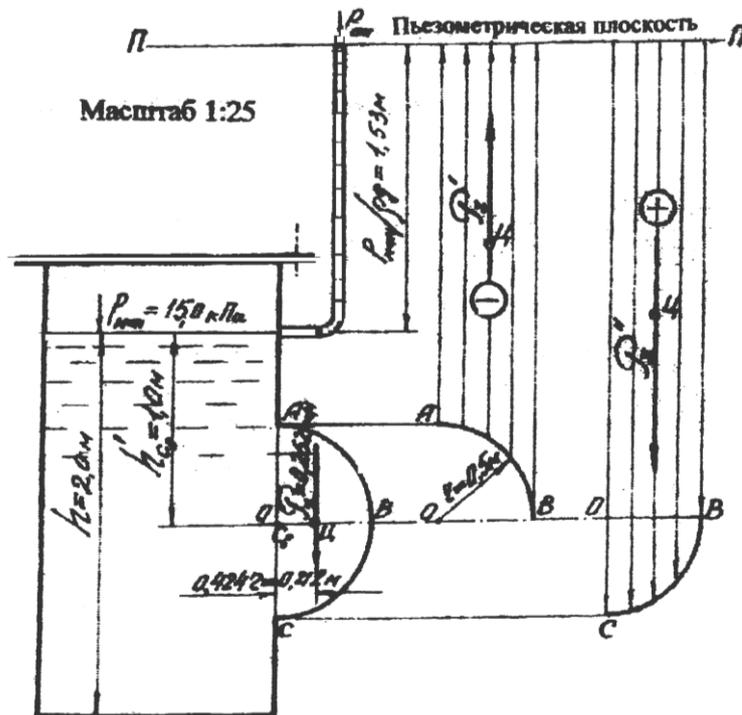


Рис. 3.2.10. К определению вертикальной составляющей P_z на полусферическую крышку ABC

Из рис. 3.2.10 следует, что $W = W'' - W'$ представляет собой половину объема шара, т. е.

$$W = 1/2 \cdot 4/3\pi r^3 = 2/3 \cdot 3,14 \cdot 0,5^3 = 0,262 \text{ м}^3.$$

Таким образом, вертикальная составляющая равна $P_z = \rho g W = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,262 = 2570 \text{ Н} = 2,57 \text{ кН}$, направлена вниз и стремится сдвинуть крышку ABC .

Линия действия силы P_z пройдет через центр тяжести объема W (на рис. 3.2.10 через центр тяжести полукруга).

3.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 3.3.1. Круглое отверстие радиусом r в дне резервуара, частично заполненного водой, закрыто клапаном-полусферой ABC такого же радиуса (рис. 3.3.1). Вес клапана – G .

Определить:

а) силу T , необходимую для поднятия клапана при глубине воды $H = 2,5$ м, если внешнее давление $P_{o\ abc} = P_{атм}$. Снаружи на резервуар действует атмосферное давление $P_{атм}$;

б) при какой глубине воды H клапан откроется автоматически, если $P_{o\ abc} = 80$ кПа, а снаружи резервуара давление равно $P_{атм} = 100$ кПа?

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.1.

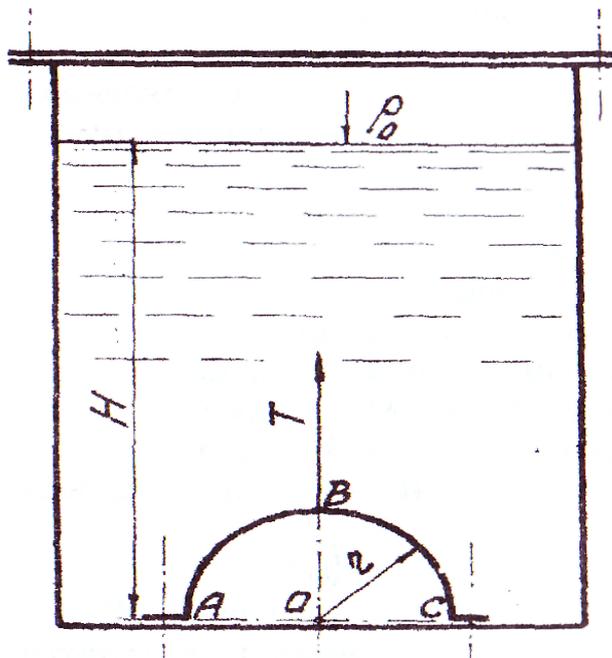


Рис. 3.3.1. К задаче 3.3.1

Таблица 3.3.1

№ варианта	r , м	G , Н
1	0,2	200
2	0,3	700
3	0,4	600
4	0,5	500
5	0,6	400
6	0,7	300

Задача 3.3.2. Определить величину и направление действия силы давления воды на 1 м ширины криволинейного затвора AB , представляющего собой четверть кругового цилиндра (рис. 3.3.2) радиусом r , а также координаты центра давления.

Решить задачу аналитическим и графоаналитическим методами.
Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.2.

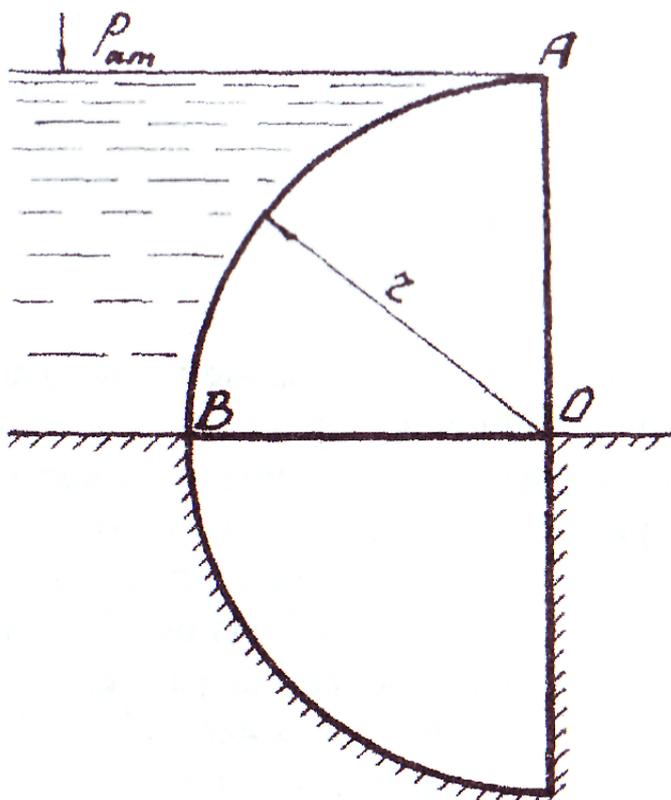


Рис. 3.3.2. К задаче 3.3.2

Таблица 3.3.2

№ варианта	r , м
1	1,5
2	2,0
3	2,5
4	2,4
5	3,5
6	3,0

Задача 3.3.3. Определить величину и направление действия силы давления воды на цилиндрическую поверхность AB затвора при ширине его $b = 1$ м и радиусе кривизны r (рис. 3.3.3), а также координаты центра давления.

Решить задачу аналитически и проверить графически.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.3.

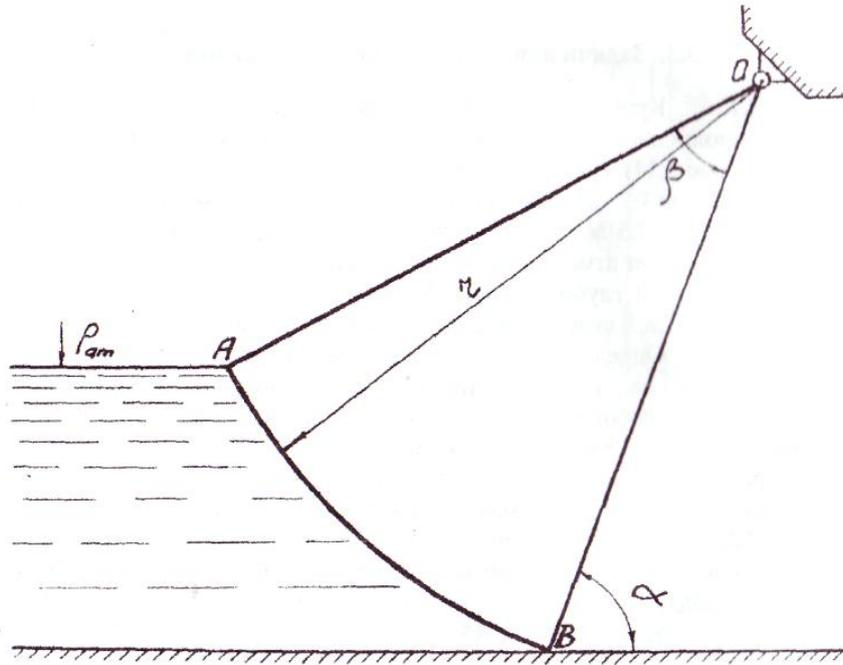


Рис. 3.3.3. К задаче 3.3.3

Таблица 3.3.3

№ варианта	r , м	α°	β°
1	5,0	45	45
2	2,5		35
3	3,0	30	35
4	4,5		60
5	6,0	60	30
6	6,5		25

Задача 3.3.4. Определить величину и направление действия силы давления воды на 1 м ширины b затвора AB (рис. 3.3.4), представляющего собой четверть цилиндра радиусом r .

Найти координаты центра давления.

Решить задачу аналитически и проверить графически.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.4.

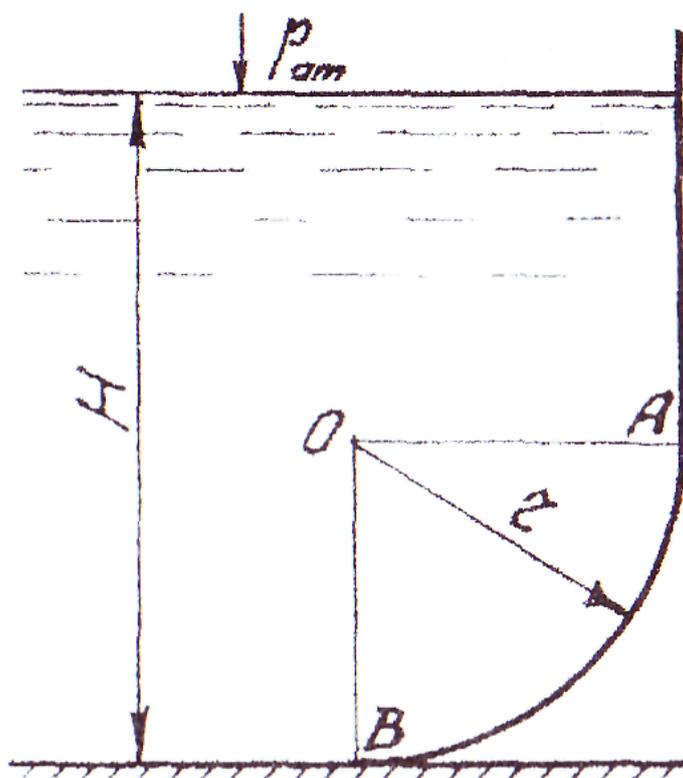


Рис. 3.3.4. К задаче 3.3.4

Таблица 3.3.4

№ варианта	r , м	H , м
1	1,0	2,0
2	2,0	2,5
3	3,0	4,0
4	4,0	5,5
5	4,5	6,0
6	5,0	6,5

Задача 3.3.5. Определить величину и направление действия равнодействующей силы давления воды на цилиндрический затвор диаметром $d = 2$ м, перегородивающий прямоугольный канал шириной $b = 5$ м (рис. 3.3.5).

Найти координаты центра давления.

Решить задачу аналитически и проверить графически.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.5.

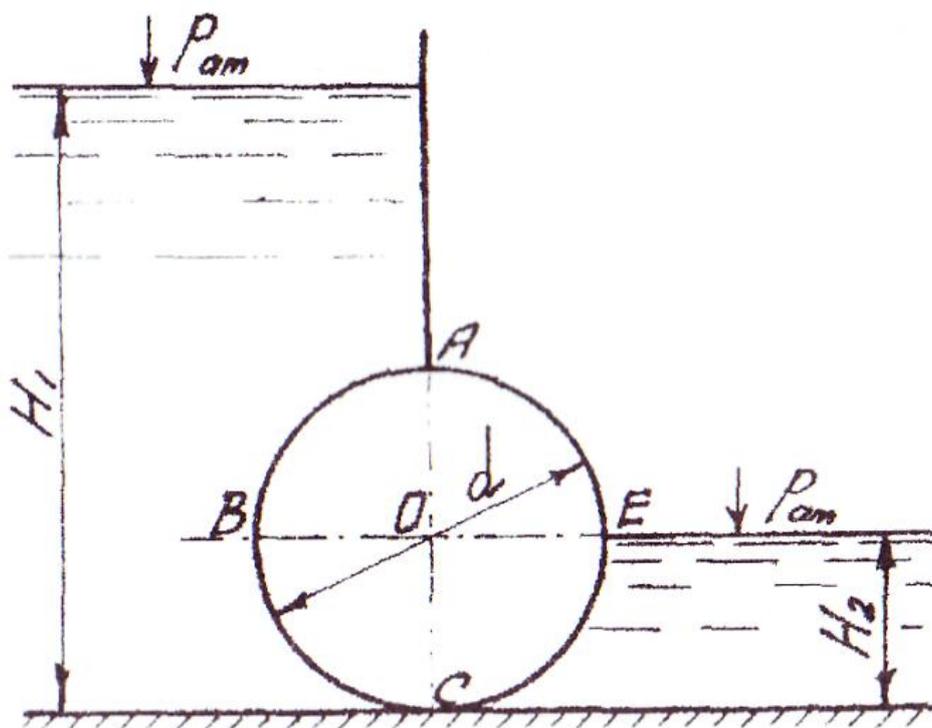


Рис. 3.3.5. К задаче 3.3.5

Таблица 3.3.5

№ варианта	H_1 , м	H_2 , м
1	3,0	1,0
2	2,5	
3	3,5	
4	4,5	
5	4,0	
6	5,5	

Задача 3.3.6. Цилиндрический затвор диаметром d (рис. 3.3.6), перекрывающий прямоугольное отверстие ($d \times b$) в вертикальной стенке, может вращаться вокруг горизонтальной оси. Центр тяжести C затвора находится на радиусе, расположенном под углом $\varphi = 45^\circ$ к горизонту, и удален от оси вращения $OC = 0,1xd$. Заглубление нижней точки затвора E под уровень h . Вес G затвора равен 2000 Н.

Определить:

а) силы давления воды на затвор и точки их приложения (аналитическим и графическим методами);

б) удерживающий и опрокидывающий моменты сил давления воды на затвор.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.6.

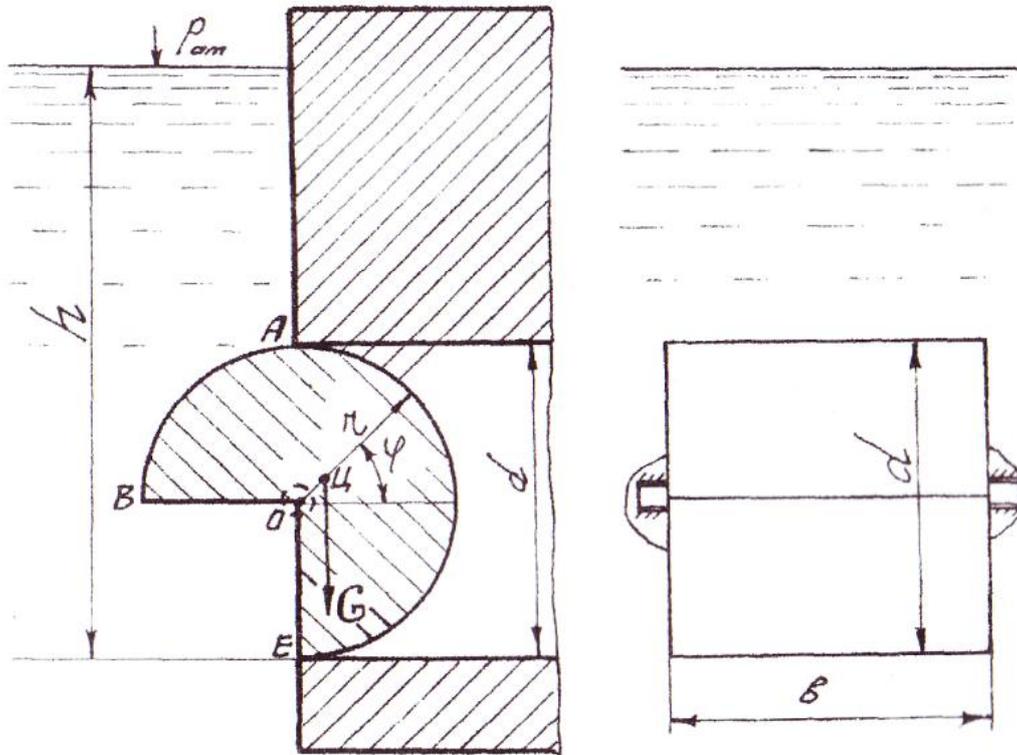


Рис. 3.3.6. К задаче 3.3.6

Таблица 3.3.6

№ варианта	d , м	h , м	b , м
1	1,0	1,3	5
2	1,5	2,3	
3	2,0		
4	2,5	3,3	
5	3,0	4,3	
6	3,5		

Задача 3.3.7. Цилиндрический затвор диаметром d (рис. 3.3.7), перекрывающий прямоугольное отверстие ($d \times b$) в вертикальной стенке, может вращаться вокруг горизонтальной оси. Центр тяжести C затвора находится на радиусе, расположенном под углом $\varphi = 45^\circ$ к горизонту, и удален от оси вращения $OC = 0,1 \times d$. Заглубление нижней точки затвора E под уровень h .

Определить:

а) силы давления воды на затвор и точки их приложения (аналитическим и графическим методами);

б) вес G затвора, чтобы он находился в равновесии в положении, изображенном на рис. 3.3.7.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.7.

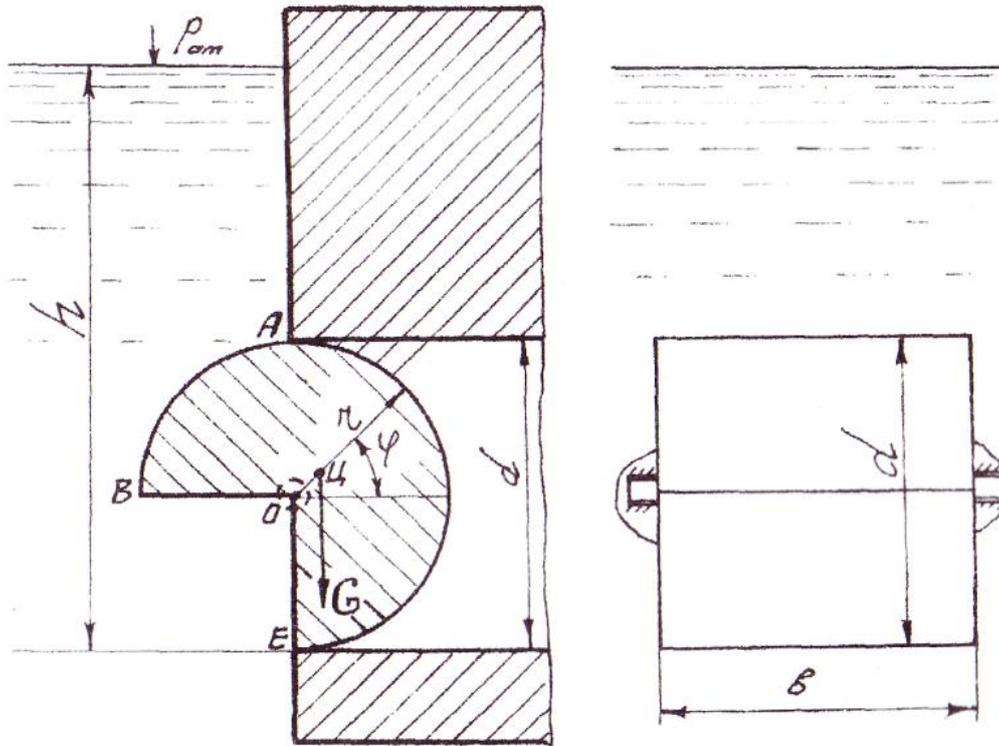


Рис. 3.3.7. К задаче 3.3.7

Таблица 3.3.7

№ варианта	d , м	h , м	b , м
1	2,0	2,3	6
2	1,5		4
3	2,0	3,3	7
4	2,5		2
5	3,0	4,3	7
6	3,5		3

Задача 3.3.8. Определить величину равнодействующей силы гидростатического давления на цилиндрическую поверхность AB радиусом r и шириной b (рис. 3.3.8).

Найти координаты центра давления.

Решить задачу аналитически и проверить графически.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.8.

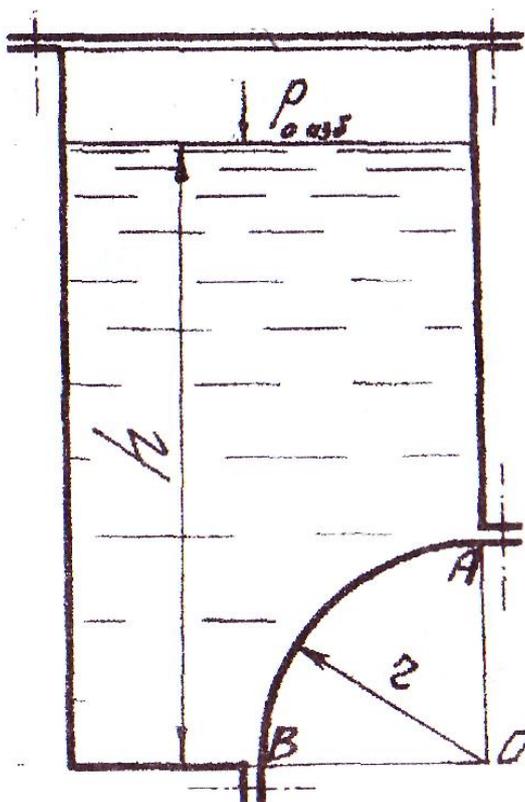


Рис. 3.3.8. К задаче 3.3.8

Таблица 3.3.8

№ варианта	r , м	b , м	h , м	ρ , кг/м ³	$P_{o\text{ изб}}$, кПа
1	0,6	2,0	2,5	800	15
2	0,4	1,4	2,2	1000	-40
3	0,7	2,0	2,9	900	15
4	0,8	1,4	2,8	1200	-40
5	0,9	2,0	2,7	750	15
6	1,0	1,4	2,2	1000	-40

Задача 3.3.9. В герметично закрытый резервуар (рис. 3.3.9) налиты вода, глубина которой – h_2 , и масло, слой которого составляет h_1 , при плотности масла ρ_m . На свободной поверхности масла действует избыточное гидростатическое давление $P_{o\text{ изб}}$.

Определить горизонтальную и вертикальную составляющие равнодействующей силы гидростатического давления, действующей на цилиндрическую крышку ABC с радиусом r , закрывающую прямоугольное отверстие высотой a и шириной b .

Задачу решить аналитическим методом и проверить графически.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.9.

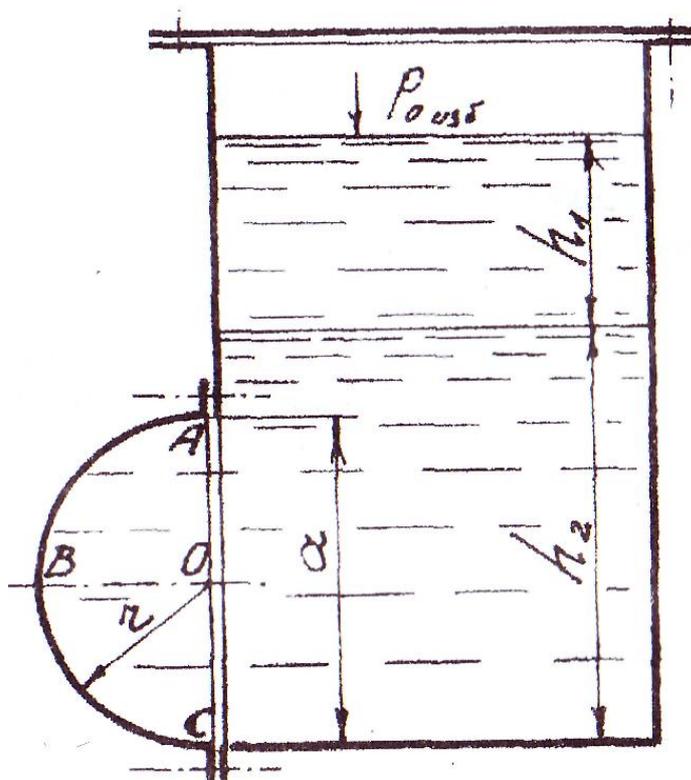


Рис. 3.3.9. К задаче 3.3.9

Таблица 3.3.9

№ варианта	r , м	a , м	b , м	h_2 , м	h_1 , м	ρ_m , кг/м ³	$P_{o\text{ изб}}$, кПа
1	0,7	1,4	1,2	2,2	0,5	800	15
2	0,5	1,0	1,5	1,5	0,4		-35
3	0,75	1,5	1,2	2,2	0,5		15
4	0,85	1,7	1,5	2,5	0,4		-35
5	0,8	1,6	1,2	2,2	0,5		15
6	1	2	1,5	2,5	0,4		-35

Задача 3.3.10. Цилиндрический резервуар диаметром d и высотой h (рис. 3.3.10) имеет коническое днище ABC высотой a и полусферическую крышку EFK . Резервуар заполнен жидкостью плотностью ρ и находится под манометрическим давлением $P_{ман}$, показываемым пружинным манометром M , подключенным в точке A .

Определить силы, стремящиеся оторвать от резервуара коническое днище и полусферическую крышку. Найти также силу, заставляющую работать на разрыв цилиндрическую часть резервуара высотой h .

Примечание. Усилие, разрывающее цилиндрическую часть резервуара, определить аналитически и проверить графически.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.10.

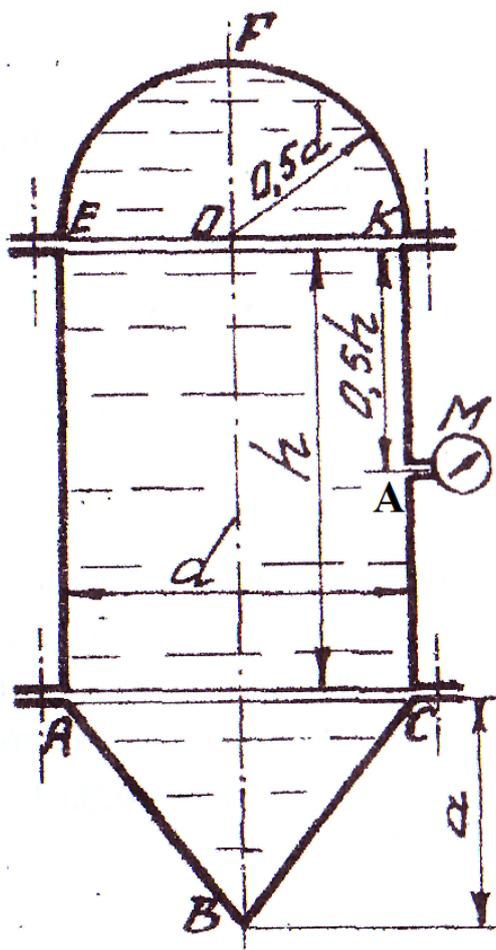


Рис. 3.3.10. К задаче 3.3.10

Таблица 3.3.10

№ варианта	$P_{ман},$ кПа	$d,$ м	$h,$ м	$a,$ м	$\rho,$ кг/м ³
1	30	0,85	1,0	0,7	800
2	50	1,0	1,5	0,8	1000
3	40	0,95	1,2	0,7	900
4	60	1,05	1,4	0,8	1200
5	55	0,9	1,2	0,7	800
6	35	1,1	1,6	0,8	1000

Задача 3.3.11. Определить силы давления воды на полуцилиндрическую крышку ABC , закрывающую прямоугольное отверстие высотой a и шириной b (рис. 3.3.11), и на полусферическую крышку EFK , закрывающую круглое отверстие диаметром d .

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.11.

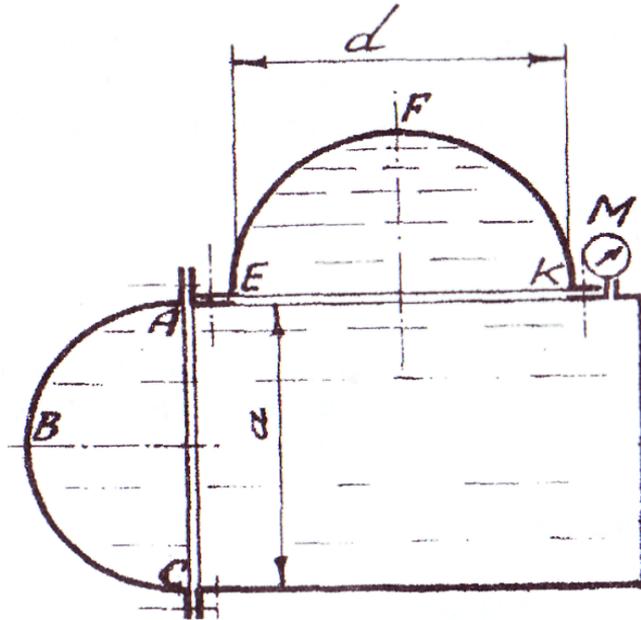


Рис. 3.3.11. К задаче 3.3.11

Таблица 3.3.11

№ варианта	$P_{ман}$, кПа	a , м	b , м	d , м
1	40	0,8	1,6	1,0
2	25	1,0	2,0	1,2
3	45	1,8	1,6	1,3
4	55	1,2	2,0	1,4
5	60	1,4	1,6	1,5
6	35	0,9	2,0	1,6

Задача 3.3.12. Определить равнодействующую силу давления воды на полуцилиндрическую поверхность. Глубина воды слева $h_1 = d$, справа – h_2 , длина образующей цилиндра – b (рис. 3.3.12.).

Координаты центра давления определить аналитическим способом и проверить графически.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.12.

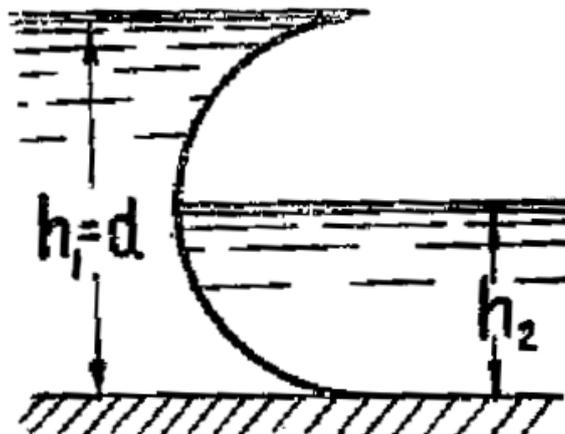


Рис. 3.3.12. К задаче 3.3.12

Таблица 3.3.12

№ варианта	$h_1 = d$, м	h_2 , м	b , м
1	1,0	0,5	3
2	1,5	0,75	3
3	2,0	1,0	4
4	2,4	1,2	4,8
5	2,8	1,4	5,0
6	3,0	1,5	6,0

Задача 3.3.13. Глубина воды в верхнем бьефе – h_1 , в нижнем – h_2 , длина образующей цилиндрической поверхности – b , а глубина погружения ее наивысшей точки – a .

Определить силу манометрического давления воды на цилиндрическую поверхность и центр давления (рис. 3.3.13).

Координаты центра давления равнодействующей силы вычислить аналитическим способом и проверить графически.

Найти угол наклона равнодействующей к горизонту.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.13.

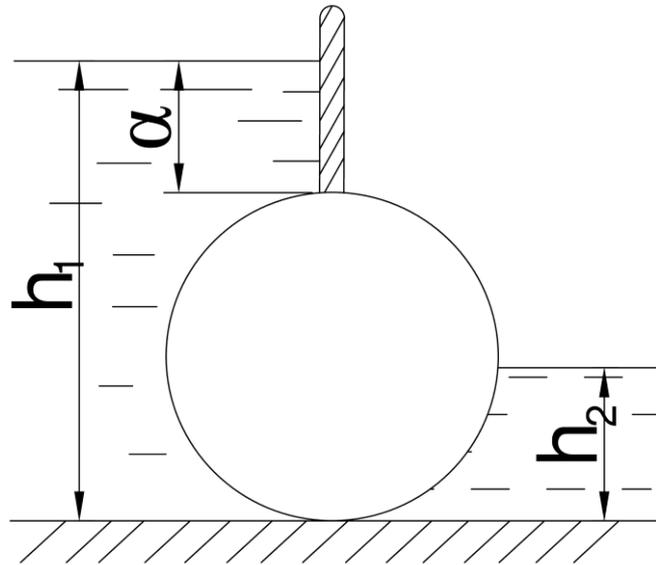


Рис. 3.3.13. К задаче 3.3.13

Таблица 3.3.13

№ варианта	h_1 , м	a , м	h_2 , м	b , м
1	2,5	0,7	0,9	7,5
2	3,0	1,0	1,0	6,0
3	3,5	1,1	1,2	7,0
4	4,0	1,0	1,5	8,0
5	5,0	1,6	1,7	7,0
6	5,5	1,5	2,0	8,0

Задача 3.3.14. Определить силу давления воды на криволинейный (секторный) затвор и центр давления (рис. 3.3.14).

Координаты центра давления найти аналитическим и графическим способами.

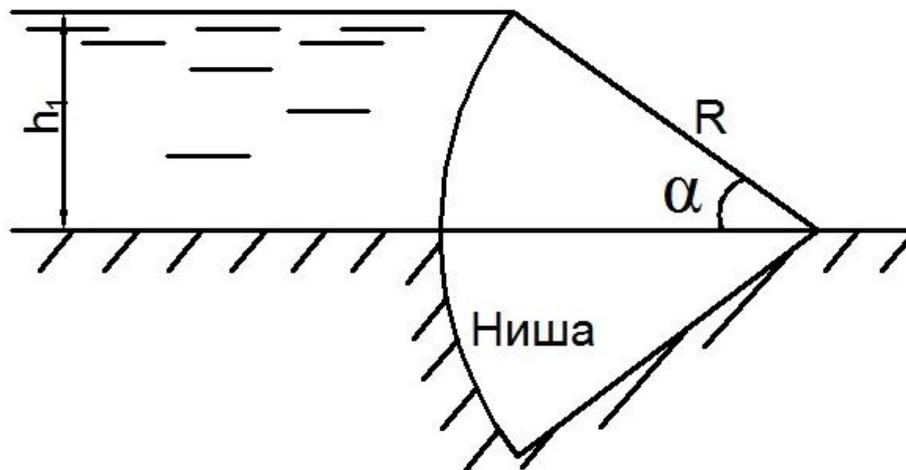


Рис. 3.3.14. К задаче 3.3.14

Таблица 3.3.14

№ варианта	h_1 , м	b , м	r , м
1	1,5	4,0	2,5
2	2,0	6,0	3,0
3	2,5	5,0	4,0
4	3,0	9,0	6,0
5	3,5	7,0	5,0
6	4,0	10,0	6,0

Задача 3.3.15. Радиус затвора – r , угол с горизонтом – α , ширина отверстия, перекрываемого затвором, – b , уровень воды совпадает с верхней кромкой затвора.

Найти начальное подъемное усилие T , пренебрегая трением в шарнире. Вес затвора G приложен в середине пролета на биссектрисе угла α на расстоянии $0,7r$ от оси вращения ($G = 1,47 \cdot 10^3 F \sqrt{F}$, где G – вес затвора в ньютонах; F – площадь затвора в свету, m^2).

Определить силу давления воды на секторный затвор, установленный на водосливе практического профиля (рис. 3.3.15).

Координаты центра давления вычислить аналитическим способом и проверить графически.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.15.

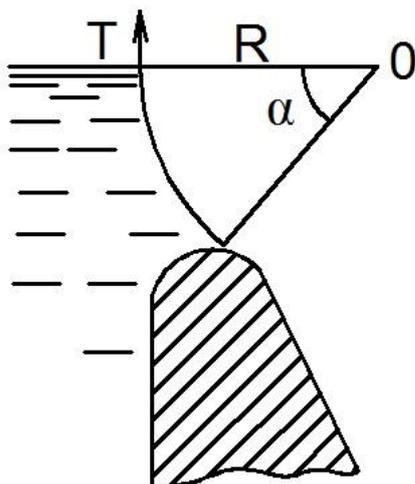


Рис. 3.3.15. К задаче 3.3.15

Таблица 3.3.15

№ варианта	r , м	b , м	α°
1	3,5	4,5	60
2	4,0	5,0	45
3	4,5	5,5	30
4	5,0	6,0	60
5	5,5	6,5	45
6	6,0	7,0	30

Задача 3.3.16. Подводный железобетонный туннель круглого сечения с внутренним диаметром D и толщиной стенки δ удерживается от всплытия тросами T , расположенными попарно через каждые 6 м длины туннеля.

Определить натяжение тросов, полагая дополнительную нагрузку, приходящуюся на 1 м длины туннеля G и плотность бетона, равную $2,5 \text{ т/м}^3$ (рис. 3.3.16).

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.16.

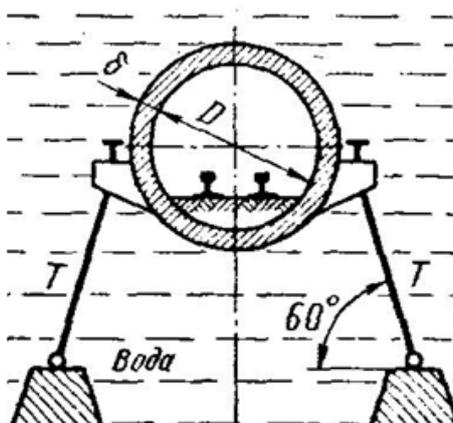


Рис. 3.3.16. К задаче 3.3.16

Таблица 3.3.16

№ варианта	D , м	δ , мм	G , кН
1	3,0	250	10
2	3,1	260	11
3	3,2	270	12
4	3,3	280	13
5	3,4	290	14
6	3,5	300	15

Задача 3.3.17. Угловой поворотный затвор не допускает выхода воды из резервуара через боковое отверстие A . Прямоугольные крылья затвора имеют размер B , перпендикулярный чертежу, и радиальный размер $R_1 = R_2$ (рис. 3.3.17).

Определить:

а) полную силу P давления воды на затвор и момент M этой силы относительно оси затвора, расположенной на расстоянии H от свободной поверхности;

б) при какой длине R_2 гидравлический момент на затворе станет равным нулю.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.17.

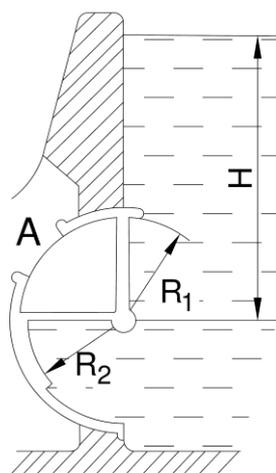


Рис. 3.3.17. К задаче 3.3.17

Таблица 3.3.17

№ варианта	B , м	R_1 , м	H , м
1	1,0	1,0	2,5
2	1,2	1,1	2,7
3	1,4	1,2	2,9
4	1,6	1,3	3,1
5	1,8	1,4	3,3
6	2,0	1,5	3,5

Задача 3.3.18. Определить значения и направления равнодействующих сил давления воды на плоскую и полусферическую крышки резервуара (рис. 3.3.18) диаметром D в случаях:

- а) $y = +D/n$;
- б) $y = -D/n$;
- в) $y = 0$.

Показать на чертеже горизонтальные и вертикальные составляющие и полные силы давления воды на крышки.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.18.

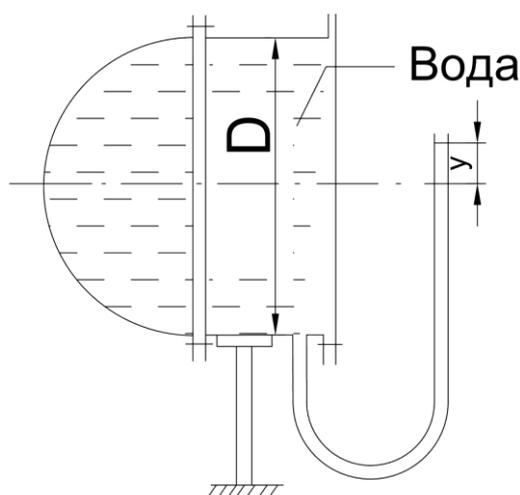


Рис. 3.3.18. К задаче 3.3.18

Таблица 3.3.18

№ варианта	D , м	n
1	1,0	5
2	1,2	4
3	1,4	3
4	1,6	2
5	1,8	1
6	2,0	0,5

Задача 3.3.19. В прямоугольном окне вертикальной стенки резервуара установлен на цапфах цилиндрический затвор диаметром D и длиной B (рис. 3.3.19).

Определить:

- а) усилие на цапфы и момент от воздействия воды на затвор в изображенном на рис. 3.3.19 положении при напоре H ;
- б) каковы будут усилие на цапфы и момент, если повернуть затвор на 180° .

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.19.

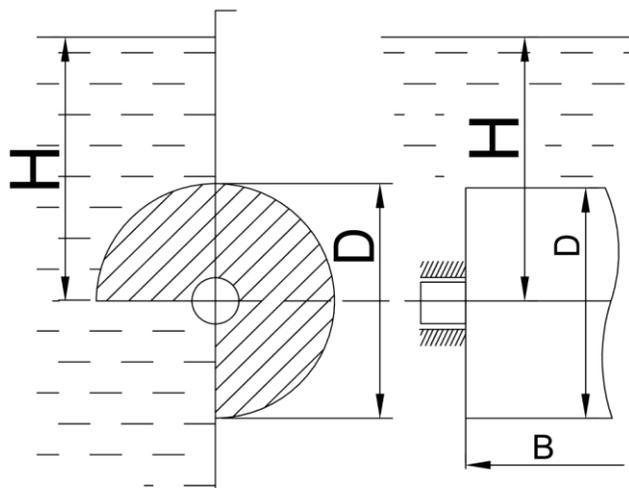


Рис. 3.3.19. К задаче 3.3.19

Таблица 3.3.19

№ варианта	D , м	B , м	H , м
1	0,80	3,0	1,0
2	0,85	3,1	1,2
3	0,90	3,2	1,4
4	0,95	3,3	1,6
5	1,00	3,4	1,8
6	1,10	3,5	2,0

Задача 3.3.20. Определить отрывающее и сдвигающее усилия от воздействия воды на полусферическую крышку люка радиуса R , если напор над центром люка – H , а угол наклона стенки к горизонту – α (рис. 3.3.20).

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.20.

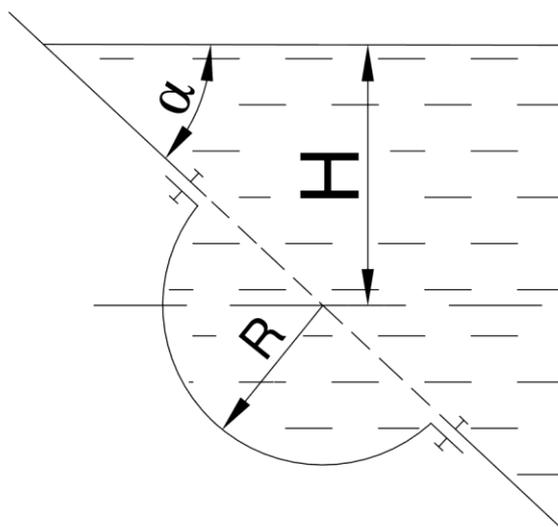


Рис. 3.3.20. К задаче 3.3.20

Таблица 3.3.20

№ варианта	R , м	H , м	α , °
1	0,50	1,0	30
2	0,55	1,1	35
3	0,60	1,2	40
4	0,65	1,3	45
5	0,70	1,4	50
6	0,75	1,5	60

Задача 3.3.21. Определить:

а) значение и направление полной силы давления воды на цилиндрический затвор (валец) диаметром D и длиной L (рис. 3.3.21);

б) натяжение цепи X , необходимое для подъема затвора весом G путем качения его вверх по наклонным направляющим, составляющим угол с горизонтом α (при трогании с места и при выходе из воды);

в) как изменяется сила давления воды на затвор и натяжение цепи, если уровень воды за плотиной поднимется до центра затвора.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.21.

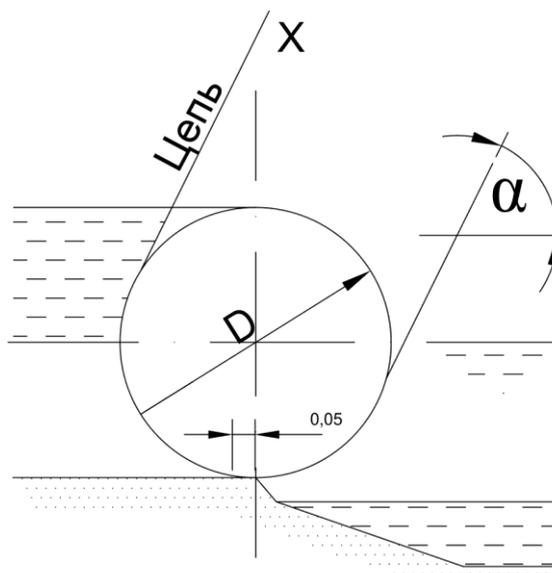


Рис. 3.3.21. К задаче 3.3.21

Таблица 3.3.21

№ варианта	D , м	L , м	G , т	α , °
1	1,20	16	40	70
2	1,25	15	41	35
3	1,30	14	42	40
4	1,35	13	43	45
5	1,40	12	44	50
6	1,45	11	45	60

Задача 3.3.22. Секторный затвор радиусом R и шириной B поддерживает напор воды H (рис. 3.3.22). Для пропуска воды затвор поднимается цепью, поворачиваясь вокруг горизонтальной оси на цапфах диаметром d .

Вес затвора G приложен в его центре тяжести, расположенном на радиусе $r = 0,75R$.

При закрытом затворе ось его вращения и верхний обрез сектора лежат в одной горизонтальной плоскости, расположенной выше свободной поверхности на расстоянии h .

Определить:

- силу, нагружающую подшипники, и ее направление;
- силу, прижимающую затвор к порогу;
- натяжение цепи при подъеме затвора (коэффициент трения в цапфах принять за f).

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.22.

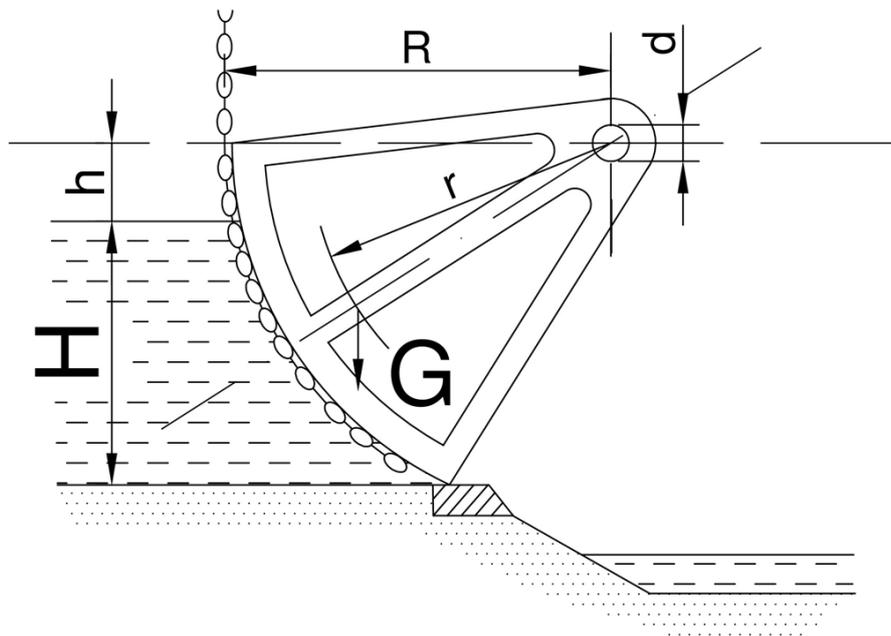


Рис. 3.3.22. К задаче 3.3.22

Таблица 3.3.22

№ варианта	R , м	B , м	H , м	d , мм	G , т	h , м	f
1	5,0	4,5	3,5	150	3,0	1,0	0,30
2	5,5	5,0	4,0	160	3,5	1,1	0,28
3	6,0	4,5	4,5	170	4,0	1,2	0,26
4	6,5	5,0	5,0	180	4,5	1,3	0,24
5	7,0	4,5	5,1	190	5,0	1,4	0,22
6	7,5	5,0	5,2	200	5,5	1,5	0,20

Задача 3.3.23. Горизонтальный цилиндрический сосуд диаметром d с полусферической и конической крышками заполнен жидкостью с удельным весом γ_1 (рис. 3.3.23). Правая половина цилиндра (с конической крышкой) вставлена в замкнутый резервуар и находится под уровнем другой жидкости (с удельным весом γ_2) на глубине a .

Определить горизонтальные и вертикальные составляющие давления жидкости на полусферическую и коническую крышки A и B , если показание вакуумметра – V , показание манометра – M и $\gamma_1 = \gamma_2$.

Показать все составляющие и полные силы давления жидкости на полусферу и конус на чертеже.

Как изменятся силы при $\gamma_1 = 0,8\gamma_2$?

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.23.

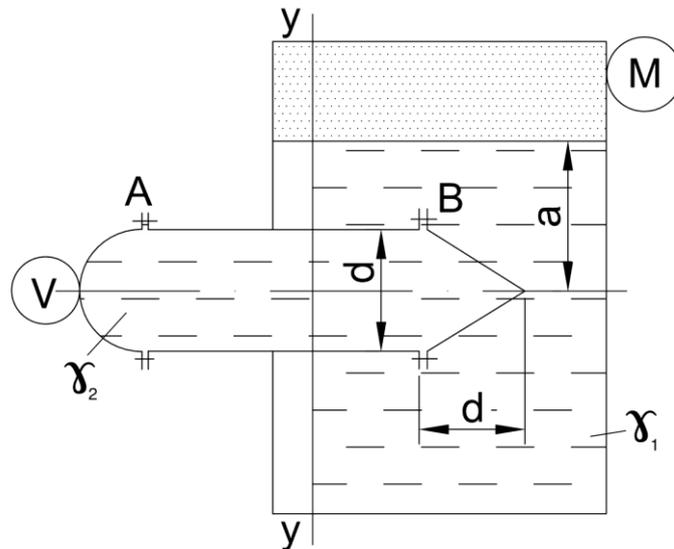


Рис. 3.3.23. К задаче 3.3.23

Таблица 3.3.23

№ варианта	d , м	a , м	V , кгс/см ²	M , кгс/см ²	γ_2 , кгс/м ³
1	0,80	2,0	0,10	0,3	1000
2	0,85	2,2	0,15	0,4	990
3	0,90	2,4	0,20	0,5	980
4	0,95	2,6	0,25	0,6	970
5	1,00	2,8	0,30	0,7	960
6	1,10	3,0	0,35	0,8	950

Задача 3.3.24. Отверстие в дне замкнутого сосуда, содержащего жидкость с относительной плотностью δ , закрыто подвижной конической пробкой размерами D , d , a (рис. 3.3.24). Пробка укреплена на штоке диаметром d_1 . Уровень бензина расположен выше пробки на расстоянии b .

Пренебрегая собственным весом пробки и трением в сальнике, определить:

а) начальное усилие P , необходимое для подъема пробки при показании манометра M ;

б) давление воздуха в сосуде, при котором усилие P окажется равным нулю.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.24.

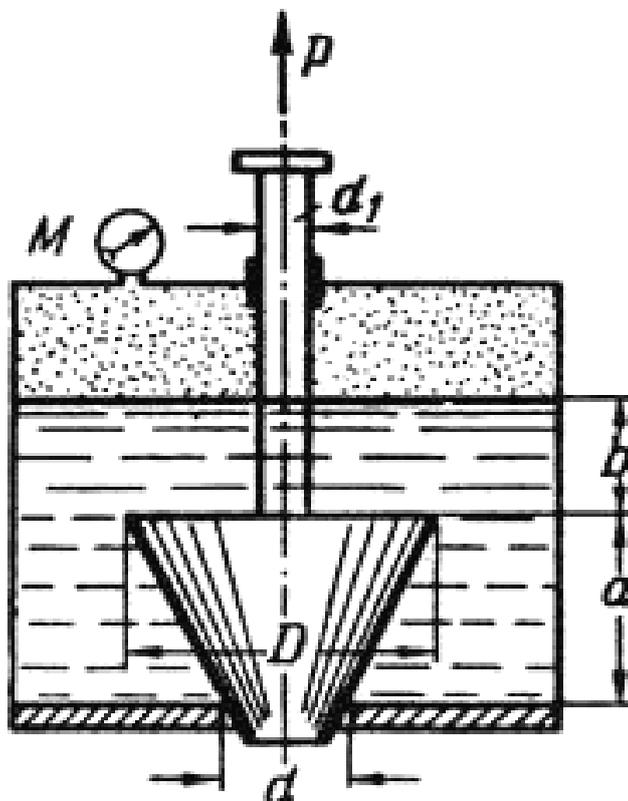


Рис. 3.3.24. К задаче 3.3.24

Таблица 3.3.24

№ варианта	D , мм	d , мм	a , мм	d_1 , мм	b , мм	M , кгс/см ²	δ
1	100	50	100	25	50	0,1	0,83
2	105	55	110	26	55	0,15	0,85
3	110	60	120	25	60	0,20	0,87
4	115	65	115	28	65	0,25	0,89
5	120	60	120	30	70	0,30	0,91
6	125	65	110	25	75	0,35	0,93

Задача 3.3.25. Определить усилия, нагружающие болтовые группы A , B и C (рис. 3.3.25) при гидравлической пробе симметричного сосуда размерами D_1 , D_2 , h (G_1 – вес крышки, G_2 – вес конической обечайки сосуда). Сосуд заполнен водой, пробное давление – M .

Изменятся ли усилия на болты, если вместо указанной на схеме опоры подвесить сосуд за фланец А?

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.25.

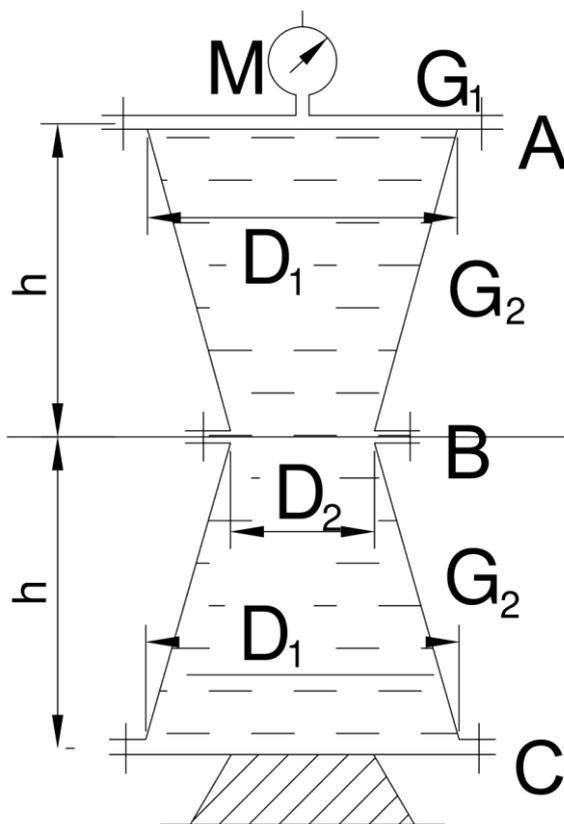


Рис. 3.3.25. К задаче 3.3.25

Таблица 3.3.25

№ варианта	D_1 , м	D_2 , м	h , м	G_1 , кгс	G_2 , кгс	M , кгс/см ²
1	1,8	0,90	1,2	600	900	0,50
2	1,9	0,95	1,3	650	1000	0,55
3	2,0	1,00	1,4	700	1100	0,60
4	2,1	1,05	1,5	750	1200	0,65
5	2,2	1,10	1,6	800	1300	0,70
6	2,3	1,15	1,7	900	1500	0,75

Задача 3.3.26. Секторный затвор плотины радиусом R поддерживает напор воды H . Поворачиваясь вокруг оси O , затвор может погружаться в выемку, сделанную в теле плотины и заполненную водой.

Пренебрегая трением в опорах вращения, определить усилие T (приходящееся на 1 м длины затвора), с которым затвор прижимается к уступу А плотины, если вес 1 пог. м затвора – G , размеры – a и b

(рис. 3.3.26), расстояние от оси O до вертикали, проходящей через центр тяжести затвора – c .

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.26.

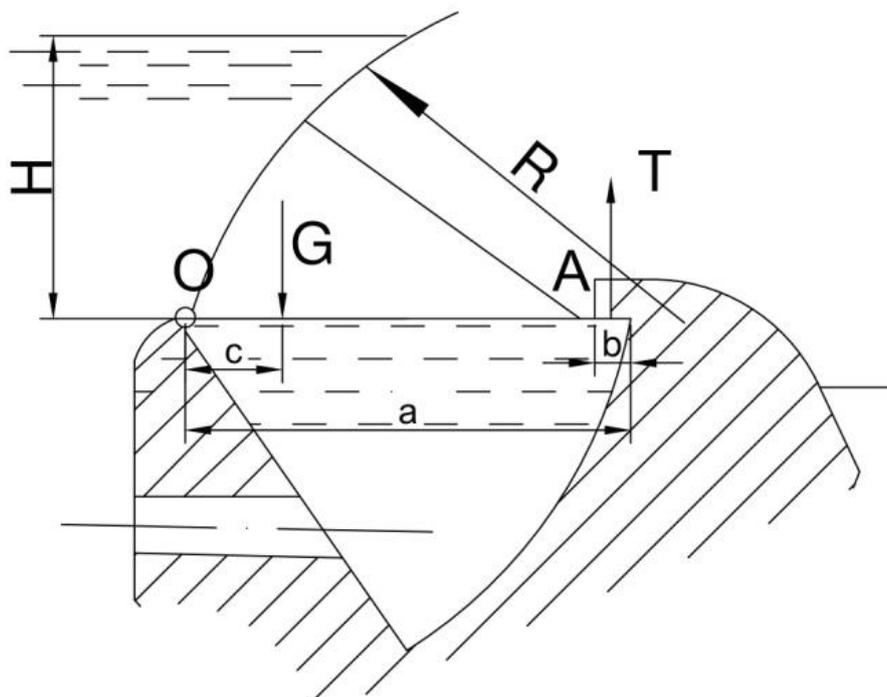


Рис. 3.3.26. К задаче 3.3.26

Таблица 3.3.26

№ варианта	R , м	H , м	G , т	a , м	b , м	c , м
1	4,5	3,00	1,00	4,0	0,30	0,60
2	4,6	3,05	1,05	4,1	0,32	0,65
3	4,7	3,10	1,10	4,2	0,34	0,70
4	4,8	3,15	1,15	4,3	0,36	0,75
5	4,9	3,20	1,20	4,4	0,38	0,80
6	5,0	3,25	1,25	4,5	0,40	0,85

Задача 3.3.27. Каков наименьший уровень H воды в сосуде, при котором стальной шар (относительная плотность материала шара – δ) радиусом R , перекрывающий круглое отверстие диаметром $d = 1,5R$ в вертикальной стенке, будет находиться в равновесии (рис. 3.3.27)?

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.27.

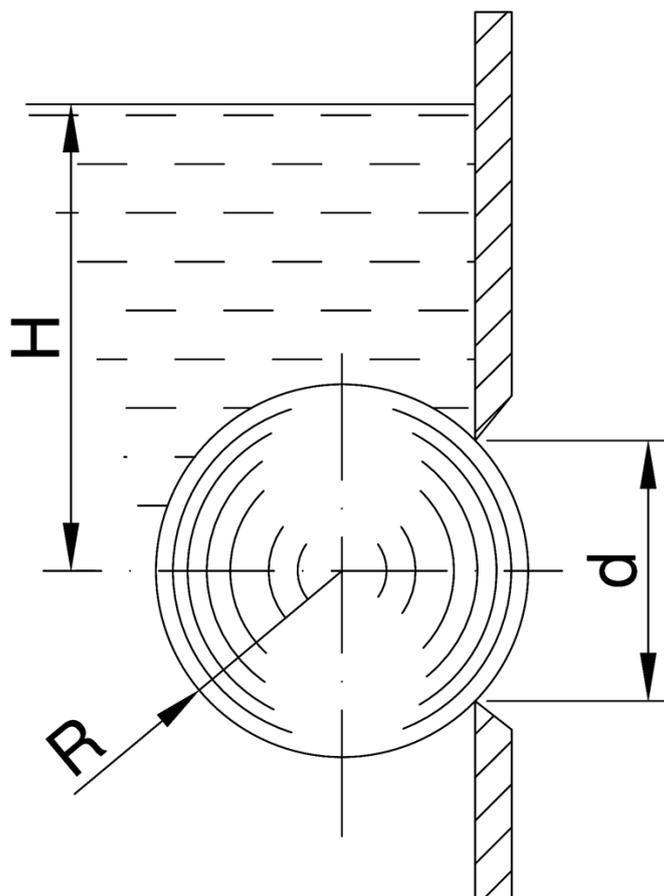


Рис. 3.3.27. К задаче 3.3.27

Таблица 3.3.27

№ варианта	R , м	δ
1	0,100	8,0
2	0,110	7,9
3	0,120	7,8
4	0,130	7,7
5	0,140	7,6
6	0,150	7,5

Задача 3.3.28. Отверстие диаметром D_0 в плоской стенке, наклоненной к вертикали под углом α , перекрыто конической пробкой, размеры которой – D_1 , D_2 и L (рис. 3.3.28). Уровень воды в сосуде – H .

Определить силу давления воды на пробку.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.28.

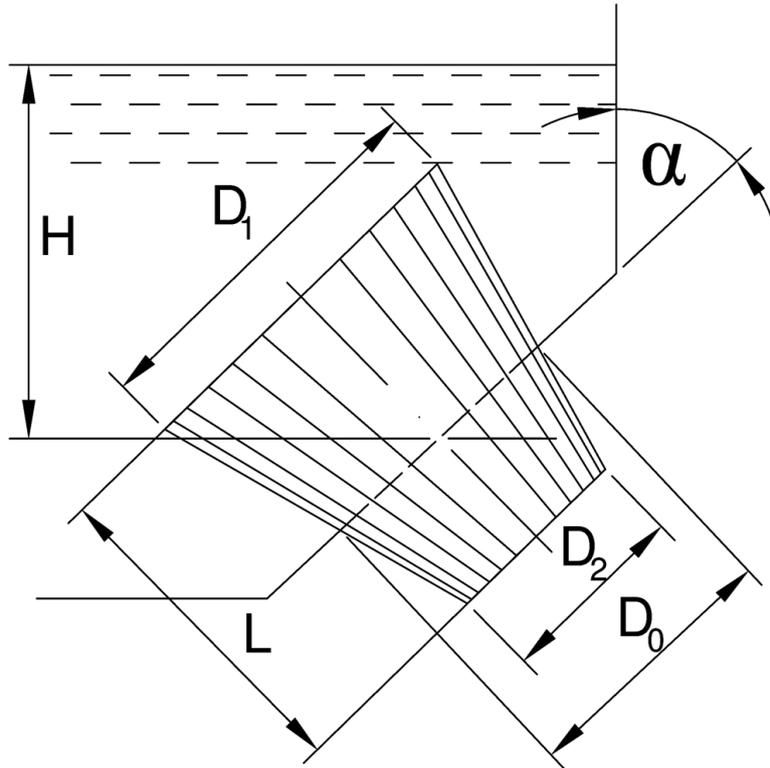


Рис. 3.3.28. К задаче 3.3.28

Таблица 3.3.28

№ варианта	D_0 , мм	D_1 , мм	D_2 , мм	L , мм	H , мм	α , °
1	200	300	150	300	500	45
2	210	310	155	310	510	40
3	215	320	160	305	520	35
4	220	330	165	300	530	30
5	225	340	170	296	540	50
6	230	350	175	292	550	60

Задача 3.3.29. Показание манометра, присоединенного к днищу бака, равно M (рис. 3.3.29).

Найти давление воздуха p_x , находящегося над водой, при известных h_1 и h_2 .

Определить растягивающее и сдвигающее усилия болтов, крепящих к вертикальной стенке бака коническую крышку с размерами d и l . Весом крышки пренебречь. Построить график зависимости этих сил от давления M .

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 3.3.29.

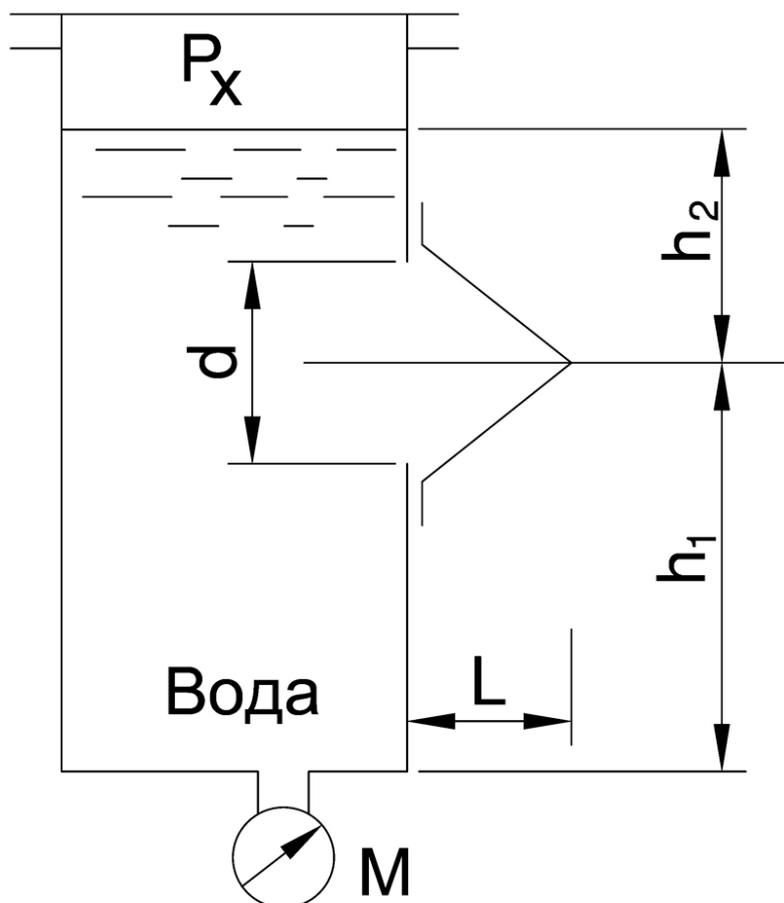


Рис. 3.3.29. К задаче 3.3.29

Таблица 3.3.29

№ варианта	d , м	l , м	M , кПа	h_1 , м	h_2 , м
1	0,80	0,60	10	1,8	1,1
2	0,85	0,65	15	2,0	1,2
3	0,90	0,80	20	2,2	1,3
4	0,95	0,90	25	2,4	1,4
5	1,00	1,00	30	2,6	1,5
6	1,10	1,05	35	2,8	1,6

II. ГИДРОДИНАМИКА

4. УРАВНЕНИЕ Д. БЕРНУЛЛИ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

4.1. Основные теоретические положения и расчетные зависимости

Уравнение Д. Бернулли для установившегося и плавно изменяющегося движения элементарной струйки идеальной жидкости имеет вид

$$z_1 + p_1 / \rho g + u_1^2 / 2g = z_2 + p_2 / \rho g + u_2^2 / 2g = const, \quad (4.1)$$

где z_1, z_2 – геометрические напоры (высоты), т. е. превышения живых сечений $d\omega_1$ и $d\omega_2$ элементарной струйки над плоскостью сравнения (рис. 4.1.1); $p_1 / \rho g$ и $p_2 / \rho g$ – пьезометрические напоры (высоты), т. е. высоты, отвечающие гидродинамическим давлениям p_1 и p_2 в сечениях $d\omega_1$ и $d\omega_2$; $u_1^2 / 2g$ и $u_2^2 / 2g$ – скоростные напоры (высоты), отвечающие местным скоростям u_1 и u_2 .



Рис. 4.1.1. График напоров для элементарной струйки идеальной жидкости

Сумма трех слагаемых уравнения (4.1) составляет полный, или гидродинамический, напор H (см. рис. 4.1.1):

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} = H = \text{const.} \quad (4.2)$$

График, представленный на рис. 4.1.1, называют диаграммой уравнения Д. Бернулли (графиком напоров) для элементарной струйки идеальной жидкости, который дает наглядное представление о перераспределении напоров по пути движения жидкости.

Каждое из слагаемых уравнения (4.1) с энергетической точки зрения представляет собой разновидность удельной механической энергии, т. е. энергии, отнесенной к единице веса жидкости. Сумма $z + p / \rho g$ представляет собой удельную потенциальную энергию жидкости, а слагаемое $u^2 / 2g$ – удельную кинетическую энергию жидкости.

Из уравнения (4.1) следует, что полная удельная энергия элементарной струйки идеальной жидкости остается постоянной в любом ее сечении. По существу уравнение (4.1) выражает закон сохранения механической энергии применительно к движущейся идеальной жидкости.

Для элементарной струйки реальной (вязкой) жидкости уравнение (4.1) принимает вид

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + h'_{w1-2}, \quad (4.3)$$

где h'_{w1-2} – потери полного напора (полной удельной энергии) на преодоление работы сил внутреннего трения, обусловленных вязкостью жидкости.

Полная удельная энергия элементарной струйки реальной жидкости убывает по направлению движения.

Для потока реальной несжимаемой жидкости уравнение Д. Бернулли записывают в виде

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h'_{w1-2}, \quad (4.4)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты Кориолиса (коррективы кинетической энергии), учитывающие неравномерность распределения местных скоростей u по живому сечению ω потока жидкости (чем больше эта неравномерность, тем больше величина коэффициента α . При равномерном движении в условиях турбулентного режима $\alpha = 1,05-1,15$, а для ламинарного режима $\alpha = 2$); v_1, v_2 – средние скорости движения потока жидкости в живых сечениях ω_1 и ω_2 ; $h'_{w1-2} = H_1 - H_2$ – потери полного напора на пути движения жидкости между живыми сечениями ω_1 и ω_2 , т. е. часть полной удельной энергии потока жидкости, затраченная на преодоление работы сил внутреннего и внешнего трения.

Иначе говоря, величина h_{w1-2} представляет собой сумму всех потерь напора на преодоление гидравлических сопротивлений (по длине и местных):

$$h_{w1-2} = \sum h_l + \sum h_m, \quad (4.5)$$

где $\sum h_l$ – сумма потерь напора по длине; $\sum h_m$ – сумма потерь напора в местных сопротивлениях.

Диаграммы уравнения Д. Бернулли (графики напоров) для потоков реальной жидкости (при равномерном и неравномерном движении) представлены на рис. 4.1.2.

Чтобы построить график напоров, необходимо:

1) вычислить потери напора по длине h_l и в местных сопротивлениях h_m , а также скоростные напоры $\alpha v^2 / 2g$ в выбранных сечениях;

2) провести на чертеже трубопровода напорную линию для идеальной жидкости, т. е. горизонтальную линию на высоте H от выбранной плоскости сравнения (в рассматриваемых случаях эта линия совпадает с уровнями свободной поверхности жидкости в открытых резервуарах);

3) отложить от этой линии вертикально вниз в выбранных сечениях потери напора h_w от начала пути до рассматриваемого сечения. Соединив концы вертикальных отрезков, получим линию полного напора;

4) отложить вниз от линии полного напора в выбранных сечениях скоростные напоры; соединив концы их линией, получим пьезометрическую линию.

Из рис. 4.1.2а следует, что при равномерном движении реальной жидкости линии полного напора и пьезометрическая представляют собой наклонные (в направлении движения жидкости) параллельные прямые, поскольку средняя скорость v во всех сечениях одинакова.

При неравномерном движении (рис. 4.1.2б) средняя скорость v по пути движения изменяется, а линии полного напора и пьезометрическая являются кривыми. При этом линия полного напора всегда понижается по пути движения жидкости (из-за нарастания потерь напора). Пьезометрическая линия при плавно увеличивающемся живом сечении по пути движения жидкости поднимается вверх, а при плавно уменьшающемся живом сечении – опускается вниз.

По графику напоров можно не только судить о характере убывания полного напора и перераспределения его составляющих по пути движения потока жидкости, но и определить их величину в любом живом сечении потока.

Для потока реальной жидкости уравнение Д. Бернулли предстает как уравнение баланса энергии с учетом ее потерь. Заметим, что теряемая энергия не исчезает бесследно, а лишь переходит в другую форму (тепловую), т. е. теряется потоком безвозвратно.

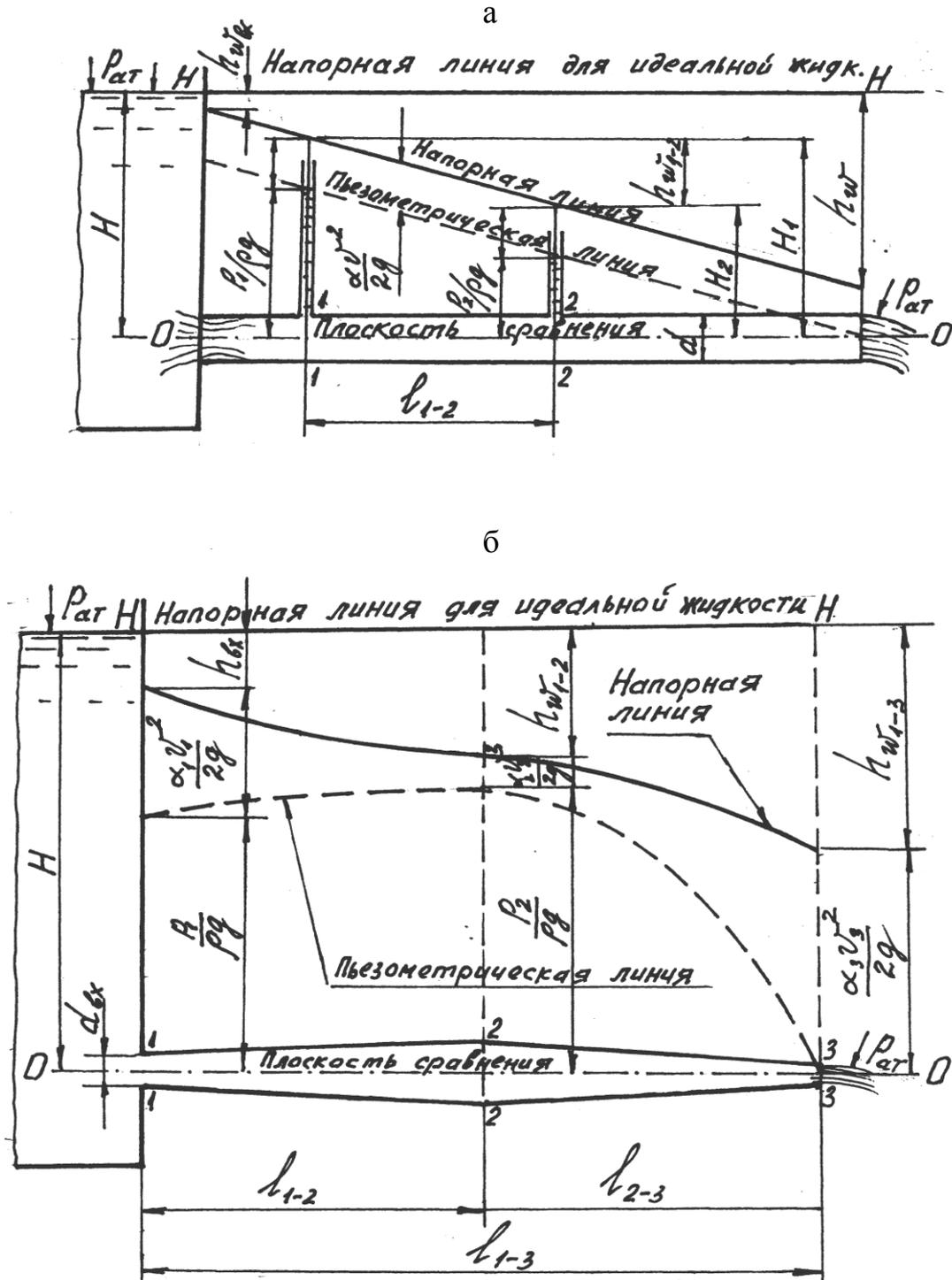


Рис. 4.1.2. Диаграммы уравнения Д. Бернулли (графики напоров) для потоков реальной жидкости:
а – при равномерном движении; б – неравномерном

Уравнения (4.1), (4.3) и (4.4) справедливы для установившегося движения несжимаемой жидкости, при котором расход жидкости во всех живых сечениях одинаков, следовательно:

$$Q = v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2 = const, \quad (4.6)$$

где v_1, v_2 – средние скорости потока жидкости в живых сечениях ω_1, ω_2 .

Из уравнения (4.6) следует, что

$$v_1 / v_2 = \omega_1 / \omega_2 = const, \quad (4.7)$$

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

Уравнение (4.6) называют уравнением неразрывности потока (уравнением баланса расхода).

С помощью уравнений (4.1), (4.3) и (4.4) решается множество задач гидравлики. Обычно выбирают два живых сечения так, чтобы для одного из них были известны величины z, p и v , а для другого – одна или две из них подлежали определению.

При двух неизвестных в дополнение к уравнению Д. Бернулли используют уравнение баланса расхода (см. уравнение (4.6)) и решают их совместно.

Потери напора (по длине и местные), а также распределение скоростей по живому сечению потока зависят от режима движения жидкости.

Экспериментальными исследованиями установлено, что движение жидкости может происходить при режимах ламинарном и турбулентном. При ламинарном режиме, наблюдающемся на малых скоростях, жидкость движется струйками (слоями) без перемешивания частиц. Турбулентный режим наблюдается при значительных скоростях и характеризуется перемешиванием частиц жидкости, что обуславливает пульсацию скоростей и давлений.

Среднюю скорость потока, при которой происходит смена режима движения жидкости, называют критической ($v_{кр}$). Величина ее, как показывают опыты в трубопроводах круглого сечения, зависит от рода жидкости, характеризуемого коэффициентом динамической вязкости μ и плотности ρ , а также от диаметра трубопровода d . Одновременно опытами установлено, что безразмерное число $Re_{кр(d)}$, отвечающее критической скорости $v_{кр}$, от μ, ρ и d не зависит, т. е.

$$Re_{кр(d)} = \frac{v_{кр} d \rho}{\mu} = \frac{v_{кр} d}{\nu} \approx 2320 = const, \quad (4.8)$$

где $\nu = \mu / \rho$ – коэффициент кинематической вязкости.

Величину $Re_{кр(d)} = 2320$ называют критическим числом Рейнольдса.

Безразмерное число Рейнольдса

$$Re_{(d)} = vd / \nu \quad (4.9)$$

является критерием, позволяющим судить о режиме движения жидкости в круглой трубе, работающей полным сечением. Если $Re_{(d)} = vd / \nu < Re_{кр(d)} = 2320$, наблюдается устойчивый ламинарный режим. Если $Re_{(d)} = vd / \nu > Re_{кр(d)} = 2320$ – турбулентный.

Когда живое сечение потока не круглое, например, в открытых каналах, в том числе и в круглой трубе, работающей неполным сечением, для установления режима движения в формулы (4.8) и (4.9) вместо диаметра d подставляют гидравлический радиус R , вычисляемый по формуле

$$R = \omega / \chi, \quad (4.10)$$

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

Различие в характере движения частиц жидкости при ламинарном и турбулентных режимах обуславливает характер зависимости потерь напора от средней скорости v . При ламинарном режиме потери напора пропорциональны средней скорости v в первой степени, а при турбулентном – в степени $1,75 \leq m \leq 2$.

Знание режима движения жидкости при гидравлических расчетах необходимо для правильной оценки потерь напора.

Потери напора по длине h_l вычисляют по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (4.11)$$

где d – внутренний диаметр трубы, а местные h_m – по формуле Вейсбаха:

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (4.12)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения (при ламинарном режиме $\lambda = f(Re)$, при турбулентном $\lambda = f(Re, \Delta_s / d)$); l – длина рассматриваемого участка трубопровода; ζ – коэффициент местного сопротивления, величина которого зависит от вида местного сопротивления и Re ; v – средняя скорость потока жидкости, вычисляемая из уравнения (4.6).

Следует иметь в виду, что в формуле (4.12) величину v вычисляют, как правило, для сечения, расположенного ниже по течению местного сопротивления, т. е. за ним. В тех случаях, когда скорость v находят для сечения перед местным сопротивлением, это условие обязательно оговаривают.

Нахождение числовых значений коэффициента λ . Значения коэффициента λ вычисляют по различным формулам в зависимости от режима движения жидкости и степени турбулентности потока, если режим турбулентный.

При ламинарном режиме ($Re < 2320$)

$$\lambda = 64 / Re. \quad (4.13)$$

При турбулентном режиме движения жидкости (как показывают экспериментальные исследования) трубопровод может работать в любой из трех областей гидравлического сопротивления, а именно, гидравлически гладких труб, для которых $\lambda = f(Re)$, докватратичного сопротивления, для

которого $\lambda = f(Re, \Delta_{\text{э}}/d)$, квадратичного сопротивления, для которого $\lambda = f(\Delta_{\text{э}}/d)$.

Здесь $\Delta_{\text{э}}$ – абсолютная эквивалентная шероховатость внутренней поверхности трубы, т.е. средняя расчетная высота выступов шероховатости, зависящая от материала трубы и состояния ее внутренней поверхности (числовые значения $\Delta_{\text{э}}$, для труб из различных материалов при различном состоянии их внутренней поверхности даны в прилож. 4); $\Delta_{\text{э}}/d$ – относительная шероховатость трубы.

Для каждой области гидравлического сопротивления различными исследователями на основании опытных данных предложены разные формулы для вычисления коэффициента λ .

Когда $3000 < Re \leq (10d / \Delta_{\text{э}})$, трубопровод работает в области гидравлически гладких труб. В этом случае коэффициент λ можно вычислять, например, по формуле Блазиуса:

$$\lambda = 0,316 / Re^{0,25}. \quad (4.14)$$

Если $(10 d / \Delta_{\text{э}}) < Re \leq (500d / \Delta_{\text{э}})$, трубопровод работает в области доквадратичного сопротивления. В этом случае для вычисления коэффициента λ можно использовать, например, формулу А.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11(\Delta_{\text{э}}/d + 68 / Re)^{0,25}. \quad (4.15)$$

Когда $Re > (500d / \Delta_{\text{э}})$, трубопровод работает в области квадратичного сопротивления. В этом случае величину λ можно вычислить, например, по формуле Шифринсона, являющейся частным случаем формулы (4.15):

$$\lambda \approx 0,11 (\Delta_{\text{э}}/d)^{0,25}. \quad (4.16)$$

Область гидравлического сопротивления удобно определять по эмпирическим графикам $\lambda = f(Re, \Delta_{\text{э}} / d)$, например, по графику Г.А. Мурина (см. прилож. 5). Чтобы определить с помощью этого графика область гидравлического сопротивления, следует на оси абсцисс найти точку, отвечающую вычисленному значению Re , и провести через нее вертикальную линию до встречи с кривой, отвечающей вычисленному значению $\Delta_{\text{э}} / d$. Если точка встречи окажется справа от пунктирной линии AB графика, то трубопровод работает в области квадратичного сопротивления, в противном случае – в области доквадратичного сопротивления. Если точка встречи окажется на самой нижней кривой графика, то это значит, что трубопровод работает в области гидравлически гладких труб.

Определение числовых значений коэффициента ζ . Величина коэффициента местного сопротивления ζ в общем случае зависит от числа Рейнольдса, формы проточной части местного сопротивления и шероховатости ее стенок, а также условий входа и выхода потока жидкости из местного сопротивления. Число Рейнольдса вычисляют для сечения трубопровода, на котором находится местное сопротивление.

Экспериментальными исследованиями установлено, что для большинства местных сопротивлений в трубопроводах при $Re > 10^5$

коэффициент ζ не зависит от Re (имеет место работа трубопровода в области квадратичного сопротивления). В тех местных сопротивлениях, где основной является вихревая потеря напора, например, при резком изменении поперечного сечения трубопровода, работа трубопровода в квадратичной области сопротивления начинается при $Re > 10^4$.

Числовые значения коэффициента ζ , а также эмпирические зависимости для их вычисления для различных местных сопротивлений, приводятся в справочной литературе. В учебном пособии (см. прилож. б) приведены числовые значения коэффициента ζ для наиболее часто встречающихся местных сопротивлений (для области квадратичного сопротивления). Если режим движения жидкости в трубопроводе турбулентный, величины коэффициента ζ принято определять, полагая работу трубопровода в области именно квадратичного сопротивления.

4.2. Примеры решения задач на применение уравнения Д. Бернулли без учета гидравлических сопротивлений

Задача 4.2.1. В трубопровод диаметром $d = 32$ мм вмонтирован расходомер Вентури – струйный расходомер (рис. 4.2.1), состоящий из плавно сужающегося участка (конфузора), соединенного цилиндрической вставкой диаметром $d = 20$ мм с постепенно расширяющимся участком (диффузором). К расходомеру подключены два пьезометра: один – перед конфузурой, другой – посередине вставки. Разность показаний пьезометров $\Delta h = 0,2$ м.

Определить расход воды Q , протекающей по трубопроводу, пренебрегая потерями напора из-за незначительной длины прибора (обычно не более $5d$) и плавно сужающегося участка между точками подключения пьезометров.

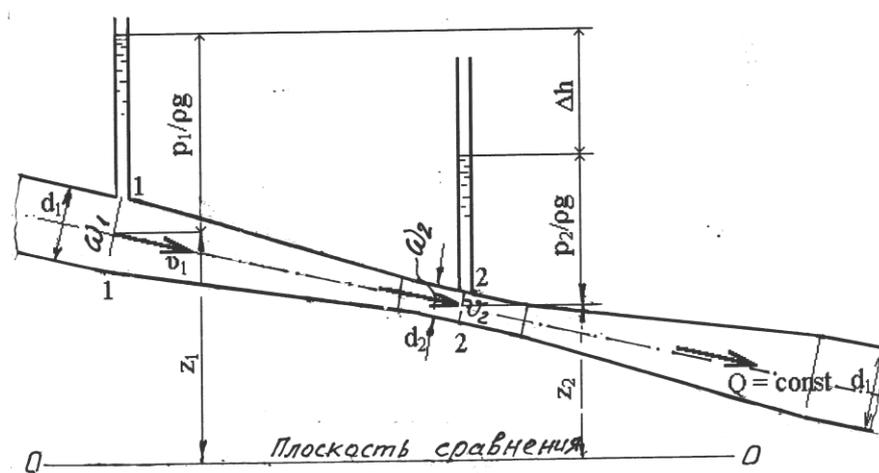


Рис. 4.2.1. Схема расходомера Вентури

Решение. Применим уравнение Д. Бернулли (см. уравнение (4.4)) к потоку воды, движущемуся по расходомеру.

Выбрав произвольную плоскость сравнения 0-0, напишем уравнение Д. Бернулли для сечений 1-1 и 2-2, в которых подключены пьезометры, пренебрегая потерями напора и считая $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 1,0$:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}.$$

С учетом того, что $(z_1 + p_1 / \rho g) - (z_2 + p_2 / \rho g) = \Delta h$ (см. рис. 4.2.1), уравнение Д. Бернулли примет вид

$$\Delta h = v_2^2 / 2g - v_1^2 / 2g.$$

Для вычисления расхода Q решим уравнение Д. Бернулли совместно с уравнением неразрывности потока (см. формулу (4.6)), из которого следует, что $v_1 = v_2 \cdot (\omega_2 / \omega_1)$, где $\omega_1 = \pi d_1^2 / 4$ – площадь поперечного сечения трубопровода; $\omega_2 = \pi d_2^2 / 4$ – площадь поперечного сечения вставки.

Решив уравнение Д. Бернулли относительно v_2 , получим:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2gh}{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2}}.$$

Расход воды $Q = v_2 \omega_2$, следовательно:

$$Q = \omega_2 \sqrt{\frac{2gh}{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2}}.$$

Подставив в последнее выражение числовые значения величин, найдем расход воды:

$$Q = 3,14 \frac{0,02^2}{4} \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 0,20}{1 - \left(\frac{0,02}{0,032}\right)^2}} = 0,000314 \cdot 2,15 = 0,00068 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Задача 4.2.2. В эжектор (водоструйный насос) подается расход воды $Q = 0,03 \text{ м}^3/\text{с}$ по подводящей трубе диаметром $d_1 = 0,1 \text{ м}$ под давлением $p_{1изб} = 200 \text{ кПа}$ (рис. 4.2.2). Температура воды $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Диаметр выходного сечения сопла эжектора $d_2 = 0,05 \text{ м}$. Вода из эжектора вытекает в атмосферу.

Определить, сможет ли данный эжектор поднимать воду из открытого резервуара, уровень воды в котором ниже оси эжектора на $z = 1,5 \text{ м}$?

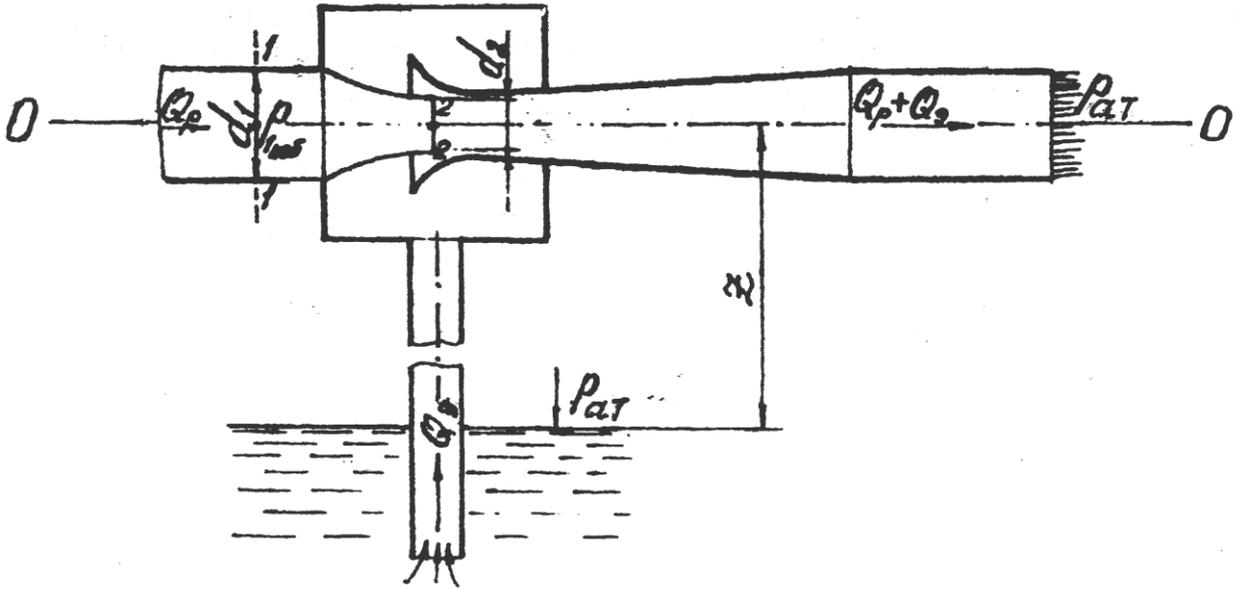


Рис. 4.2.2. Схема эжектора

Решение. Принцип работы эжектора заключается в следующем: жидкость, называемая рабочей, подается к эжектору по подводящей трубе диаметром d_1 и вытекает из сопла диаметром $d_2 < d_1$. В сечении диаметром d_2 скорость значительно возрастает (по сравнению со скоростью в трубе диаметром d), вследствие чего давление здесь снижается и становится меньше атмосферного, т. е. $p_2 < p_{атм}$. Благодаря вакууму жидкость засасывается эжектором из резервуара по вертикальной трубе, смешивается в камере с рабочей и движется вместе с ней далее по отводящей трубе.

Для ответа на вопрос, поставленный в задаче, выберем в эжекторе сечения 1-1 и 2-2 (см. рис. 4.2.2) и, приняв за плоскость сравнения ось эжектора, напишем уравнение Д. Бернулли (см. уравнение (4.3)), пренебрегая потерями напора ввиду их малости:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}.$$

Из этого уравнения найдем величину вакуума в сечении 2-2, учитывая, что вакуумметрическая высота

$$h_{\text{вак}} = \frac{p_{\text{ат}}}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g},$$

и следовательно:

$$\frac{p_2}{\rho g} = \frac{p_{\text{ат}}}{\rho g} - h_{\text{вак}}.$$

Подставив выражение для $p_2 / \rho g$ в уравнение Д. Бернулли, получим зависимость для определения величины вакуума в эжекторе:

$$h_{\text{вак}} = \frac{P_{\text{ат}} - P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2 - \alpha_1 v_1^2}{2g}. \quad (4.17)$$

Выразив средние скорости v_1 и v_2 в зависимости (4.17) через расход воды Q и воспользовавшись уравнением баланса расхода (4.6), получим окончательное выражение для определения вакуума в эжекторе:

$$h_{\text{вак}} = \frac{P_{\text{ат}} - P_1}{\rho g} + \frac{16Q^2}{\pi^2 2g} \left(\frac{\alpha_2}{d_2^4} - \frac{\alpha_1}{d_1^4} \right). \quad (4.18)$$

Для установления величины коэффициентов Кориолиса α_1 и α_2 определим режим движения воды в трубе диаметром d_1 по формуле (4.9), выразив в ней скорость через расход Q :

$$Re_1 = \frac{v_1 d_1}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d_1^2 \nu} = \frac{4Q}{3,14 \cdot d_1^2 \cdot \nu} = \frac{4 \cdot 0,030}{3,14 \cdot 0,1^2 \cdot 10^{-6}} = 382166.$$

Поскольку $Re_1 > Re_{\text{кр}} = 2320$, режим движения турбулентный. Принимаем $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 1,1$.

Подставив в выражение (4.18) числовые значения величин, найдем вакуум в эжекторе:

$$h_{\text{вак}} = \frac{98100 - 200000}{1000 \cdot 9,81} + \frac{16 \cdot 0,030^2}{3,14^2 \cdot 2 \cdot 9,81} \left(\frac{1,1}{0,05^4} - \frac{1,1}{0,10^4} \right) =$$

$$= -10,39 + 7,44 \cdot 10^{-5} \cdot (176000 - 11000) = -10,39 + 12,28 = 1,89 \text{ м.}$$

Поскольку вакуумметрическая высота $h = 1,89$ м больше высоты подъема $z = 1,5$ м, эжектор может засасывать воду из резервуара.

Задача 4.2.3. Определить, какое давление $p_{1\text{изб}}$ необходимо создать в сечении 1-1 трубопровода перед горизонтально расположенным соплом гидромонитора (рис. 4.2.3), чтобы обеспечить в его выходном сечении 2-2, где вода вытекает в атмосферу, среднюю скорость $v_2 = 30$ м/с, если в сечении 1-1 скорость $v_1 = 3,0$ м/с. Потерями напора пренебрегаем из-за незначительной длины сопла (менее $5d$).

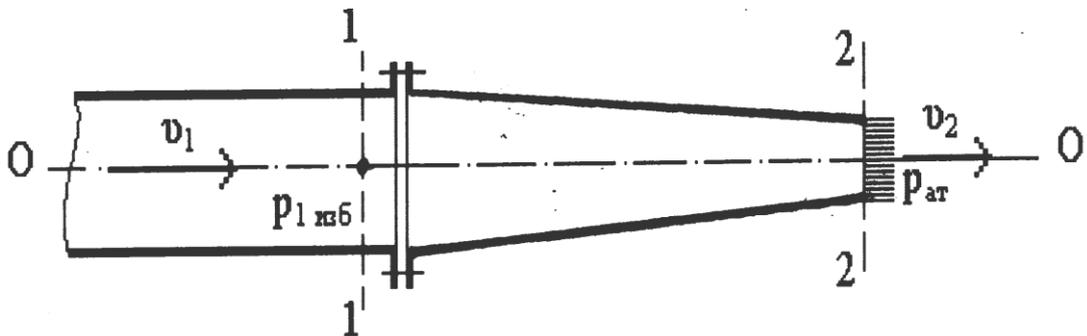


Рис. 4.2.3. Расчетная схема

Решение. Для определения величины $p_{1изб}$ применим уравнение Д. Бернулли (см. уравнение (4.4)) к сечениям 1-1 и 2-2 гидромонитора, приняв за плоскость сравнения 0-0 горизонтальную ось сопла.

Обоснованность выбора в качестве расчетных сечений 1-1 и 2-2 в данном случае очевидна (в них известно наибольшее число слагаемых уравнения Д. Бернулли). Совмещение плоскости сравнения с осью монитора упрощает вычисления, так как в этом случае геометрические высоты $z_1 = z_2 = 0$.

Для условий данной задачи уравнение Д. Бернулли (при $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 1$) примет вид

$$\frac{p_{1изб}}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_{2изб}}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g},$$

откуда

$$p_{1изб} = p_{2изб} + \frac{\rho(v_2^2 - v_1^2)}{2}. \quad (4.19)$$

Поскольку вода из гидромонитора вытекает в атмосферу, $p_{2изб} = 0$. Подставив в выражение (4.19) числовые значения величин, найдем $p_{1изб}$:

$$p_{1изб} = 1000 \cdot (30^2 - 3^2) / 2 = 445500 \text{ Па} = 0,446 \text{ МПа}.$$

Задача 4.2.4. Из открытого резервуара по вертикальной трубе диаметром $d = 0,100$ м (рис. 4.2.4) отводится в атмосферу вода. Площадь свободной поверхности воды в резервуаре $\Omega = 4,00$ м².

Определить, пренебрегая потерями напора, при какой величине H расход воды в трубе будет составлять $Q = 0,050$ м³/с.

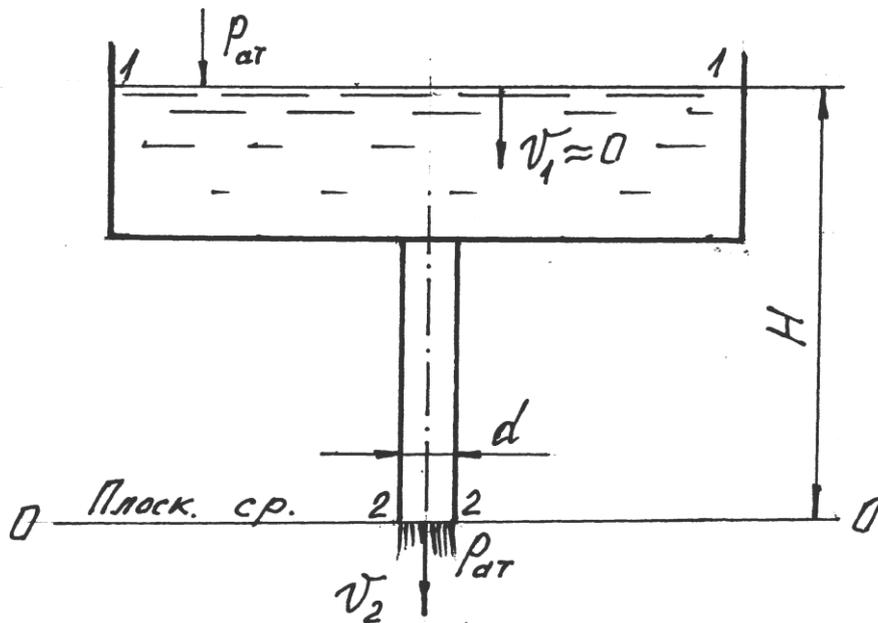


Рис. 4.2.4. Расчетная схема

Решение. В условиях данной задачи для определения величины H необходимо применить уравнение Д. Бернулли (см. формулу (4.4)), приняв за расчетные сечения свободную поверхность жидкости в резервуаре (1-1) и выходное сечение трубы (2-2). Плоскость сравнения 0-0 целесообразно совместить с центром тяжести сечения 2-2. В выбранных расчетных сечениях известно наибольшее число слагаемых уравнения Д. Бернулли, а именно:

в сечении 2-2:

$$z_2 = 0,00 \text{ м}; p_{2abc} / \rho g = p_{атм} / \rho g; \alpha_2 v_2^2 / 2g = Q^2 / 2g\omega_2^2;$$

в сечении 1-1:

$$p_{1abc} / \rho g = p_{атм} / \rho g; \alpha_1 v_1^2 / 2g \approx 0, \text{ так как } v_1 = Q / \Omega = 0,05 / 4,0 \approx 0.$$

Неизвестна только величина $z_1 = H$. Коэффициент Кориолиса $\alpha_2 = 1,1$.

Уравнение Д. Бернулли для условий данной задачи примет вид

$$H = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} = \frac{1,1Q^2}{2g\omega_2^2} = \frac{1,1Q^2 \cdot 16}{2g\pi^2 d_2^4}. \quad (4.20)$$

Подставив в уравнение (4.20) числовые значения величин, получим:

$$H = (1,1 \cdot 0,05^2 \cdot 16) / (2 \cdot 9,81 \cdot 3,14^2 \cdot 0,1^4) = 2,27 \text{ м}.$$

Задача 4.2.5. По горизонтальной трубе переменного диаметра (рис. 4.2.5) протекает идеальная жидкость плотностью $\rho = 950 \text{ кг/м}^3$. Расход жидкости $Q = 0,001 \text{ м}^3/\text{с}$, $d_1 = d_3 = 100 \text{ мм}$, $d_2 = 50 \text{ мм}$. Манометрическое давление в сечении 1-1 $p_{1ман} = 95,0 \text{ кПа}$.

Определить пьезометрические высоты в сечениях 1-1, 2-2 и 3-3, а также построить диаграмму уравнения Д. Бернулли (график напоров).

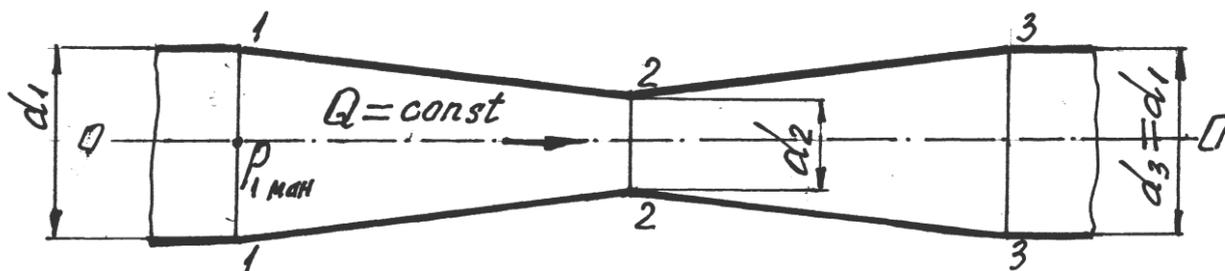


Рис. 4.2.5. Расчетная схема

Решение. Поскольку имеем дело с потоком идеальной жидкости, в любом живом сечении полный напор $z + p / \rho g + \alpha v^2 / 2g = H = const$.

Коэффициент Кориолиса α примем равным единице: $\alpha = 1,0$. Для упрощения решения задачи плоскость сравнения 0-0 совместим с осью горизонтального трубопровода, поэтому для всех трех живых сечений потока $z_1 = z_2 = z_3 = 0$.

Для построения графика напоров вычислим пьезометрические и скоростные высоты в сечениях 1-1, 2-2 и 3-3, а также полный напор H :

$$\frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_3}{\rho g} = \frac{95000}{950 \cdot 9.81} = 10,20 \text{ м};$$

$$\frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_3^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g w_1^2} = \frac{Q^2 \cdot 16}{2g \pi^2 d_1^4} = \frac{0,001^2 \cdot 16}{2 \cdot 9,81 \cdot 3,14^2 \cdot 0,1^4} = 0,08 \text{ м};$$

$$H_1 = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = 10,20 + 0,08 = 10,28 \text{ м} = H_2 = H_3 = \text{const};$$

$$\frac{v_2^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g w_2^2} = \frac{0,01^2 \cdot 16}{2 \cdot 9,81 \cdot 3,14^2 \cdot 0,050^4} = 1,33 \text{ м};$$

$$\frac{p_2}{\rho g} = 10,28 - 1,33 = 8,95 \text{ м}.$$

По полученным данным, с учетом рекомендаций, изложенных на с. 90–97 пособия, нами построен в масштабе график напоров (рис. 4.2.6).

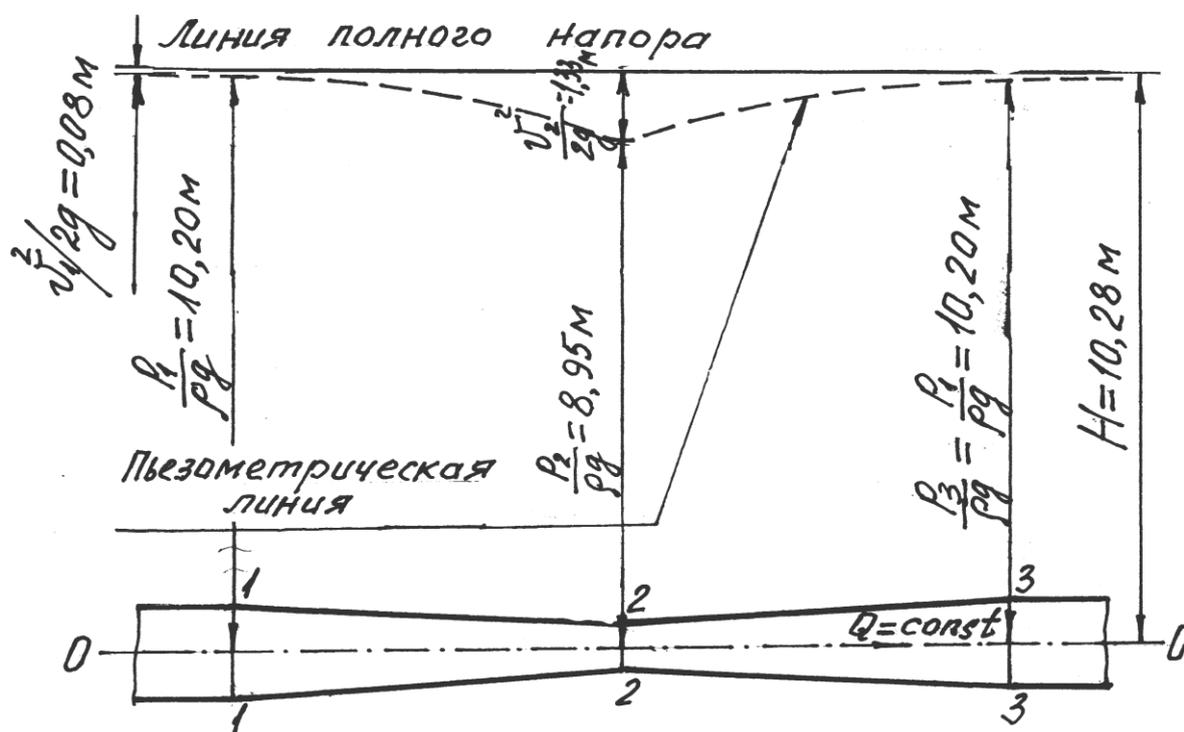


Рис. 4.2.6. Диаграмма уравнения Д. Бернулли

4.3. Примеры решения задач на применение уравнения Д. Бернулли с учетом гидравлических сопротивлений

Задача 4.3.1. Определить, при какой разности уровней воды H в реке и приемном резервуаре (рис. 4.3.1) трубопровод диаметром $d = 0,20$ м и длиной $l = 120$ м, снабженный обратным клапаном с сеткой, обеспечит пропуск расхода воды $Q = 0,050$ м³/с при работе в области квадратичного сопротивления. Трубы чугунные, бывшие в эксплуатации ($\Delta_{\Sigma} = 1,0$ мм, см. прилож. 4). Построить график напоров.

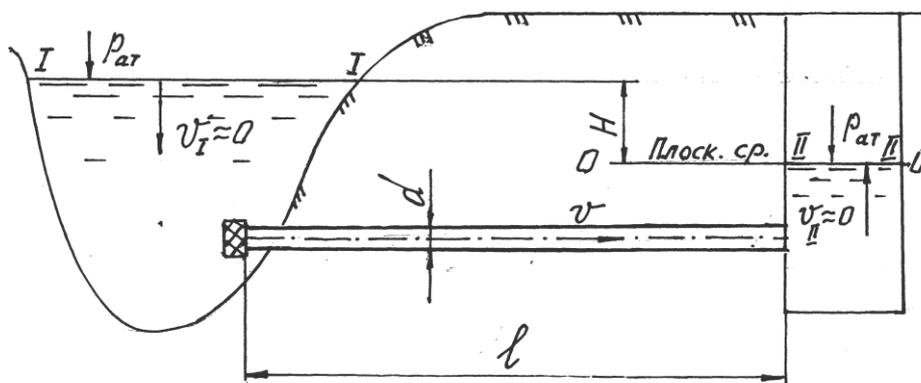


Рис. 4.3.1. Расчетная схема

Решение. Для определения величины H воспользуемся уравнением Д. Бернулли для установившегося движения потока реальной жидкости (см. формулу (4.4)).

Прежде всего на расчетной схеме (см. рис. 4.3.1) выбираем два живых сечения потока (I-I и II-II), в которых известно наибольшее число слагаемых, входящих в уравнение (4.4). В данном случае такими сечениями являются свободные поверхности воды в реке и в приемном резервуаре.

Плоскость сравнения 0-0 целесообразно совместить с сечением II-II. Слагаемые уравнения (4.4) примут вид:

$$z_1 = H; p_{1abc} / \rho g = p_{атм} / \rho g; \alpha_1 v_1^2 / 2g \approx 0;$$

$$z_2 = 0; p_{2abc} / \rho g = p_{атм} / \rho g; \alpha_2 v_1^2 / 2g \approx 0;$$

$$h_{wI-II} = h_l + \Sigma h_m = h_l + h_{o.k.c} + h_{вых},$$

где h_l – потери напора по длине трубопровода; $h_{o.k.c}$ – потери напора в обратном клапане с сеткой; $h_{вых}$ – потери напора на выходе потока из трубопровода в резервуар больших размеров (истечение под уровень).

Скоростными напорами пренебрегаем ввиду того, что площади свободной поверхности в реке и в приемном резервуаре во много раз превышают площадь поперечного сечения трубопровода.

Уравнение Д. Бернулли для условий данной задачи приобретает вид

$$H = h_l + h_{o.k.c} + h_{вых}. \quad (4.21)$$

Выразив в уравнении (4.21) потери напора по длине согласно формуле Дарси – Вейсбаха (см. уравнение (4.11)), а местные – формуле Вейсбаха (см. уравнение (4.12)), и приняв коэффициент Кориолиса $\alpha \approx 1,0$, получим уравнение Д. Бернулли в виде, удобном для вычисления разности уровней воды H :

$$H = v^2 / 2g(\lambda \cdot l / d + \zeta_{o.k.c} + \zeta_{вых}), \quad (4.22)$$

где v – средняя скорость потока воды в трубопроводе, вычисляемая из уравнения неразрывности потока (см. формулу (4.6)); λ – коэффициент гидравлического трения (при квадратичной области сопротивления его можно вычислить по формуле (4.16)); $\zeta_{o.k.c}$ и $\zeta_{вых}$ – коэффициенты сопротивления обратного клапана сетки и выхода, числовые значения которых даны в прилож. 6.

Итак, найдем величины v , λ , $\zeta_{o.k.c}$, $\zeta_{вых}$:

$$v = Q / \omega = 4Q / \pi d^2 = 4 \cdot 0,050 / 3,14 \cdot 0,20^2 = 1,59 \text{ м/с};$$

$$\lambda = 0,11(\Delta \vartheta / d)^{0,25} = 0,11(1,0 / 200)^{0,25} = 0,029;$$

$$\zeta_{o.k.c} = 8,0; \zeta_{вых} = 1,0.$$

Подставив в уравнение (4.22) числовые значения величин, вычислим разность уровней воды в реке и приемном резервуаре:

$$H = 1,59^2 / 29,81 \cdot (0,029 \cdot 120 / 0,20 + 8,0 + 1,0) = 0,13 \cdot 26,55 = 3,45 \text{ м}.$$

Для построения графика напоров вычисляем потери напора по длине и в каждом местном сопротивлении:

$$h_l = 0,13 \cdot 17,55 = 2,28 \text{ м}; h_{o.k.c} = 0,13 \cdot 8,0 = 1,04 \text{ м};$$

$$h_{вых} = 0,13 \cdot 1,0 = 0,13 \text{ м}.$$

Затем выбираем масштабы (горизонтальный – 1:1000, вертикальный – 1:50). Далее, следуя рекомендациям, изложенным на с. 92 пособия, строим график напоров (рис. 4.3.2).

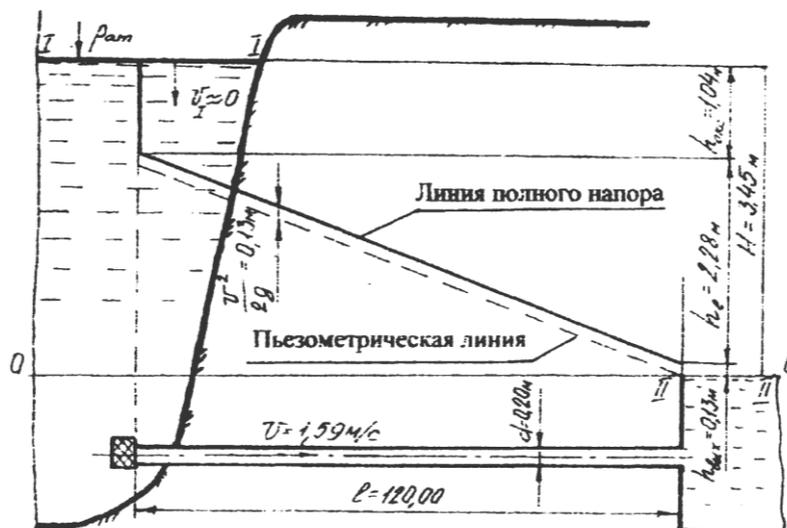


Рис. 4.3.2. График напоров

Задача 4.3.2. Из верхнего резервуара в нижний (рис. 4.3.3) поступает вода по сифонному трубопроводу диаметром $d = 0,05$ м общей длиной $l = 10$ м. Разность уровней воды в резервуарах $H = 1,2$ м. Превышение наивысшей точки трубопровода над уровнем воды в верхнем резервуаре $h = 1,0$ м. Заглубление входа сифона под уровень воды в верхнем резервуаре $h_c = 0,6$ м. Трубы стальные, умеренно заржавленные.

Определить расход воды Q , среднюю скорость движения v в трубопроводе и избыточное давление $p_{изб}$ в его наивысшей точке.

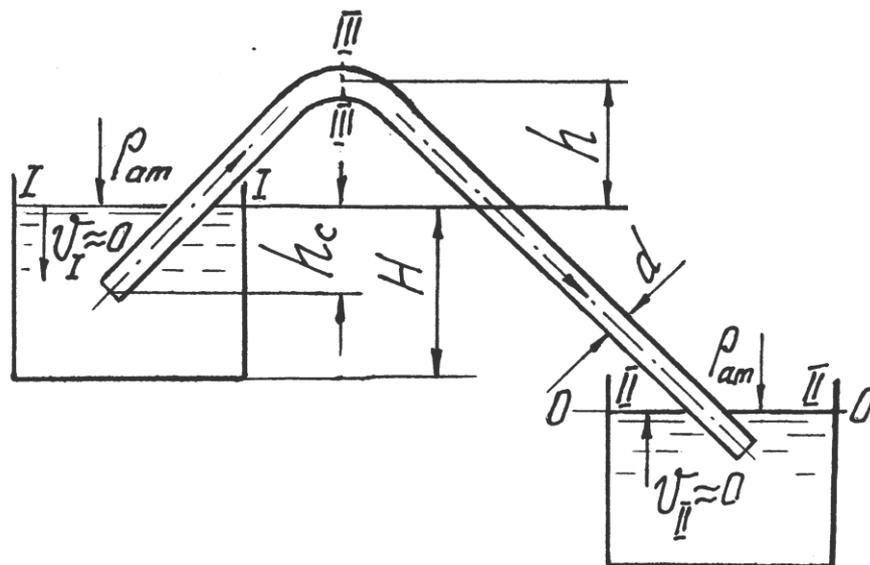


Рис. 4.3.3. Расчетная схема сифонного трубопровода

Решение. Для определения расхода воды Q применим уравнение Д. Бернулли к живым сечениям потока I-I и II-II, представляющим собой площади зеркал воды в резервуарах (см. рис. 4.3.3), при плоскости сравнения, совпадающей с сечением II-II. Выбор именно этих живых сечений объясняется тем, что в каждом из них известны все слагаемые трехчлена ($z + p/\rho g + \alpha v^2/2g$) уравнения Бернулли, а именно:

$$z_1 = H; p_{1abc}/\rho g = p_{атм}/\rho g; \alpha_1 v_1^2/2g \approx 0;$$

$$z_2 = 0; p_{2abc}/\rho g = p_{атм}/\rho g; \alpha_2 v_2^2/2g \approx 0.$$

Скоростными напорами в сечениях I-I и II-II пренебрегаем, поскольку площади свободной поверхности воды в резервуарах во много раз превышают площадь поперечного сечения трубопровода.

Уравнение Д. Бернулли для условий данной задачи примет вид

$$H = h_{W-I-II} = h_l + h_{ex} + h_{нов} + h_{вых}, \quad (4.23)$$

где h_l , h_{ex} , $h_{нов}$, $h_{вых}$ – потери напора по длине l трубопровода, при входе потока в трубопровод, в плавном повороте на 90° , при выходе потока из трубопровода в резервуар (истечение под уровень) соответственно.

Выразив потери напора по длине и в местных сопротивлениях согласно формулам Дарси – Вейсбаха (4.11) и Вейсбаха (4.12) и приняв коэффициент Кориолиса $\alpha \approx 1,0$, приведем уравнение (4.23) к виду

$$H = v^2 / 2g(\lambda \cdot l / d + \zeta_{ex} + \zeta_{нов} + \zeta_{вых}). \quad (4.24)$$

Выразив, согласно формуле (4.6), среднюю скорость v через расход Q и разрешив уравнение (4.24) относительно Q , получим выражение для вычисления расхода воды:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2gH} \frac{1}{\sqrt{\lambda \frac{l}{d} + \zeta_{ex} + \zeta_{нов} + \zeta_{вых}}}. \quad (4.25)$$

Поскольку величина расхода Q не задана, невозможно установить режим движения воды, поэтому предположим, что режим турбулентный при работе трубопровода в области квадратичного сопротивления, где $\lambda = f(\Delta_{\text{э}} / d)$.

Коэффициент гидравлического трения λ вычислим по формуле Шифринсона (4.16), приняв в соответствии с прилож. 4 абсолютную эквивалентную шероховатость трубопровода $\Delta_{\text{э}} = 0,50$ мм:

$$\lambda = 0,11(\Delta_{\text{э}} / d)^{0,25} = 0,11(0,50 / 50)^{0,25} = 0,035.$$

Величины коэффициентов местных сопротивлений находим в прилож. 6: $\zeta_{ex} = 0,50$; $\zeta_{нов} = 0,28$ (при $R_n / d = 2$); $\zeta_{вых} = 1,0$.

Подставив в выражение (4.25) числовые значения величин, вычислим расход воды Q :

$$Q = \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,2} \frac{1}{\sqrt{0,35 \frac{10}{0,05} + 0,50 + 0,28 + 0,10}} = 0,0032 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Зная Q , из формулы (4.6) установим среднюю скорость в трубопроводе:

$$v = Q / \omega = 4Q / \pi d^2 = 4 \cdot 0,0032 / 3,14 \cdot 0,05^2 = 1,64 \text{ м/с}.$$

Для определения избыточного давления в наивысшей точке трубопровода воспользуемся уравнением Д. Бернулли (4.4), записав его для сечений I-I и III-III (см. рис. 4.3.3). За плоскость сравнения примем уровень воды в верхнем резервуаре. В этом случае слагаемые уравнения (4.4) примут вид:

$$\begin{aligned} z_1 &= 0; p_{1изб} / \rho g = 0; \alpha_1 v_1^2 / 2g \approx 0; \\ z_{III} &= h; p_{IIIизб} / \rho g = ?; \alpha_{III} v_{III}^2 / 2g \approx v^2 / 2g; \\ h_{WI-III} &= h_{l_e} + h_{ex} + h_{нов}, \end{aligned}$$

где h_{l_e} – потери напора на трение по длине l_e восходящей ветви сифонного трубопровода ($l_e = (h + h_c) / \sin 45^\circ$); h_{ex} и $h_{нов}$ – потери напора при входе потока в трубопровод и в плавном повороте на 90° при $R_n / d = 2$.

С учетом формул (4.11) и (4.12) запишем уравнение Д. Бернулли в виде

$$0 = h + \frac{p_{\text{изб}}}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + \lambda \frac{lv^2}{d2g} + \zeta_{\text{ex}} \frac{v^2}{2g} + \zeta_{\text{вых}} \frac{v^2}{2g}, \quad (4.26)$$

откуда

$$p_{\text{изб}} = - \left[h + \frac{v^2}{2g} \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \zeta_{\text{ex}} + \zeta_{\text{вых}} \right) \right] \cdot \rho g. \quad (4.27)$$

Подставив в выражение (4.27) числовые значения величин, найдем избыточное давление в наивысшей точке трубопровода:

$$\begin{aligned} p_{\text{изб}} &= - \left[1,0 + \frac{1,64^2}{2 \cdot 9,81} \left(1 + 0,035 \frac{2,26}{0,05} + 0,50 + 0,28 \right) \right] \cdot 1000 \cdot 9,81 = \\ &= -14425 \text{ Па} = -14,43 \text{ кПа}. \end{aligned}$$

Как видим, в сифонном трубопроводе наблюдается вакуум. Именно в наивысшей точке сифона вакуум достигает наибольшей величины.

Задача 4.3.3. Определить превышение $H_{\text{вс}}$ горизонтальной оси центробежного насоса (рис. 4.3.4) над уровнем воды в приемном колодце (геометрическую высоту всасывания насоса).

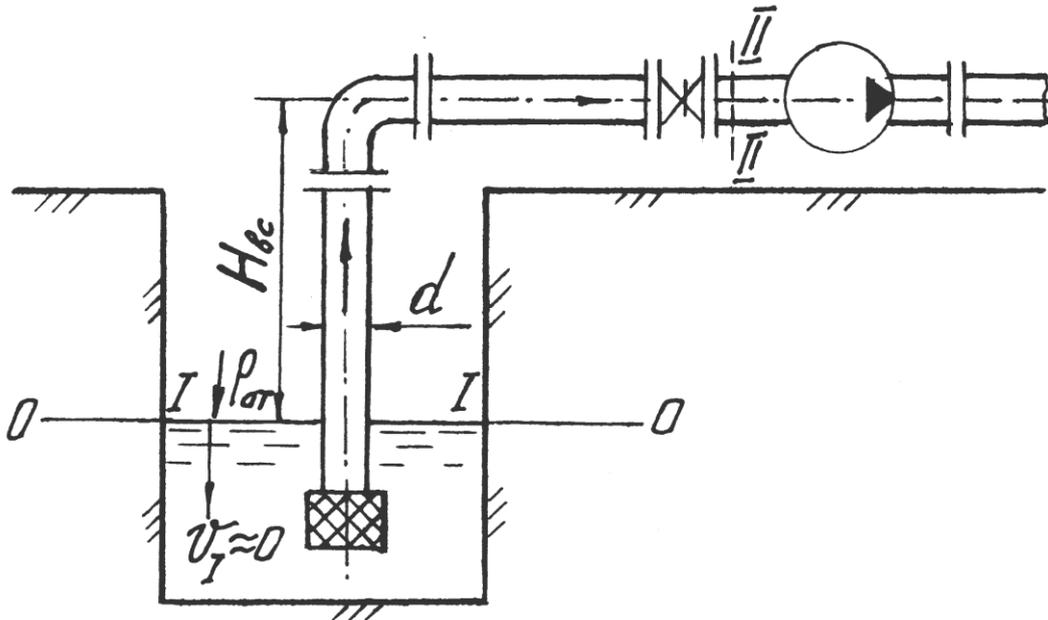


Рис. 4.3.4. Расчетная схема к определению геометрической высоты всасывания насоса $H_{\text{вс}}$

Исходные данные: длина всасывающего стального умеренно заржавленного трубопровода $l = 10$ м, внутренний диаметр $d = 0,10$ м, вакуумметрическое давление перед входом в насос $p_{\text{вак}} = 40,0$ кПа, расход воды в трубопроводе $Q = 0,01$ м³/с, температура воды $t = 20$ °С.

Решение. Для вычисления величины H_{ec} применим уравнение Д. Бернулли к живым сечениям потока I-I и II-II (см. рис. 4.3.4). Сечение I-I совместим с уровнем воды в приемном колодце (здесь же разместим и плоскость сравнения), а сечение II-II возьмем перед входом в насос, где задано давление. В выбранных сечениях известно наибольшее число слагаемых трехчлена ($z + p / \rho g + \alpha v^2 / 2g$).

Для условий задачи слагаемые уравнения Д. Бернулли будут иметь вид $z_1 = H$; $p_{1изб} / \rho g = 0$; $\alpha_1 v_1^2 / 2g \approx 0$ (площадь зеркала свободной поверхности воды в приемном колодце весьма велика по сравнению с площадью поперечного сечения всасывающего трубопровода); $z_2 = H$; $p_{2изб} / \rho g = -40000 / \rho g$; $\alpha_2 v_2^2 / 2g \approx v^2 / 2g$.

$$h_{\text{WI-II}} = h_l + h_{o.k.c} + h_{нов} + h_3,$$

где h_l – потери напора по длине трубопровода; $h_{o.k.c}$ – потери напора в обратном клапане с сеткой; $h_{нов}$ – потери напора в плавном повороте на 90° при радиусе поворота $R_n = 2d$; h_3 – потери напора в полностью открытой простой задвижке.

Выразив потери напора (по длине и местные) согласно формулам (4.11) и (4.12), представим уравнение Бернулли в виде

$$0 = H_{ec} - \frac{40000}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \zeta_{o.k.c} + \zeta_{нов} + \zeta_3 \right),$$

откуда

$$H_{ec} = \frac{40000}{\rho g} - \frac{v^2}{2g} \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \zeta_{o.k.c} + \zeta_{нов} + \zeta_3 \right). \quad (4.28)$$

где $v = Q / \omega = 4Q / \pi d^2 = 1,27$ м/с.

Для нахождения коэффициентов λ , $\zeta_{o.k.c}$, $\zeta_{нов}$, ζ_3 выясним режим движения воды и область гидравлического сопротивления, в которой будет работать всасывающий трубопровод. Вычислим число Рейнольдса по формуле (4.9):

$$Re = vd / \nu = 1,27 \cdot 0,10 / 1 \cdot 10^{-6} = 127000.$$

$Re = 127\,000 > Re_{кр} = 2320$, следовательно, режим турбулентный. Для установления области гидравлического сопротивления воспользуемся графиком Мурина (см. прилож. 5), предварительно выбрав из прилож. 4 величину абсолютной эквивалентной шероховатости ($\Delta_{\text{э}} = 0,50$ мм) и вычислив величину относительной шероховатости трубопровода: $\Delta_{\text{э}} / d = 0,5 / 100 = 0,005$. Из графика следует, что трубопровод будет работать в области квадратичного сопротивления, поэтому коэффициент λ вычислим по формуле (4.16):

$$\lambda = 0,11(\Delta_{\text{э}} / d)^{0,25} = 0,11(0,005)^{0,25} = 0,029.$$

Величины коэффициентов местных сопротивлений находим в прилож. 6 ($\zeta_{o.k.c} = 8,0$; $\zeta_{нов} = 0,28$; $\zeta_3 = 0,14$).

Подставив в уравнение (4.28) числовые значения величин, вычислим геометрическую высоту всасывания насоса:

$$H_{ec} = \frac{40000}{1000 \cdot 9,81} - \frac{1,27^2}{2 \cdot 9,81} \left(1 + 0,029 \frac{10}{0,10} + 8,0 + 0,28 + 0,14 \right) = 4,00 \text{ м.}$$

Задача 4.3.4. Для предотвращения переполнения напорного бака водой (рис. 4.3.5) предусмотрена сбросная труба общей длиной $l = 3,0$ м. Сбрасываемый расход воды $Q_{сбр} = 0,050$ м³/с, превышение уровня воды в баке над центром тяжести выходного сечения трубы $H = 2,50$ м. Трубы стальные сварные, бывшие в эксплуатации.

Определить стандартный диаметр d сбросной трубы, учитывая только потери напора по длине и полагая работу трубы в области квадратичного сопротивления.

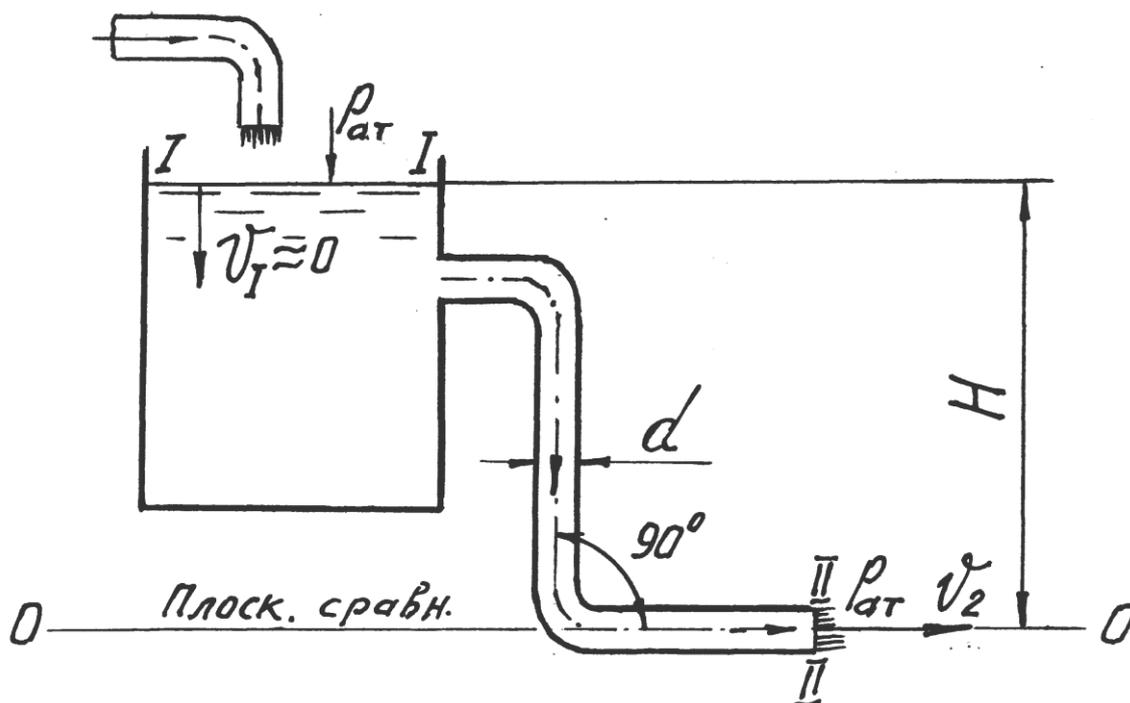


Рис. 4.3.5. Расчетная схема к определению диаметра d сбросной трубы

Решение. Применим уравнение Д. Бернулли к живым сечениям потока I-I и II-II (см. рис. 4.3.5), в которых известно наибольшее число слагаемых трехчлена ($z + p/\rho g + \alpha v^2 / 2g$). Плоскость сравнения проведем через центр тяжести сечения II-II.

Уравнение Д. Бернулли для данной задачи примет вид

$$H = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{wI-II}. \quad (4.29)$$

Выразив в уравнении (4.29) среднюю скорость в трубе v_2 через расход Q , согласно формуле (4.6), а потери напора по длине – по формуле (4.11) и приняв коэффициент Кориолиса $\alpha_2 \approx 1,0$, получим:

$$H = \frac{4^2 Q^2}{2g\pi^2 d^4} \left(1 + \lambda \frac{l}{d}\right). \quad (4.30)$$

Решив уравнение (4.30) относительно расхода воды, найдем:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2gH} \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda \frac{l}{d}}} = \frac{\pi}{d} \sqrt{2gH} \frac{d^2}{\sqrt{1 + \lambda \frac{l}{d}}} = 5,50 \frac{d^2}{\sqrt{1 + \lambda \frac{l}{d}}}. \quad (4.31)$$

Воспользовавшись выражением (4.31), определим искомый диаметр подбором, т. е. задавая произвольными стандартными значениями d и вычисляя отвечающие им значения пропускной способности трубы Q . Для уменьшения числа попыток построим график $Q = f(d)$, с помощью которого и найдем диаметр $d_{иск}$, отвечающий заданному расходу $Q_{сбр} = 0,050 \text{ м}^3/\text{с}$.

Значения коэффициента гидравлического трения λ для квадратичной области сопротивления вычислим по формуле (4.16), взяв величину абсолютной эквивалентной шероховатости $\Delta_{\text{э}}$ из прилож. 4 ($\Delta_{\text{э}} = 1,0 \text{ мм}$).

Результаты вычислений представим следующим образом:

Внутренний стандартный диаметр d , м	0,05	0,10	0,15	0,20
$\lambda = 0,11(\Delta_{\text{э}} / d)^{0,25}$	0,041	0,035	0,031	0,029
Расход воды Q , $\text{м}^3/\text{с}$	0,0074	0,0384	0,972	0,1840

График $Q = f(d)$, построенный по приведенным выше данным, представлен на рис. 4.3.6. По графику $d_{иск} = 0,110 \text{ м}$. За расчетный диаметр принимаем ближайший больший стандартный $d = 0,125 \text{ м}$ (см. прилож. 10).

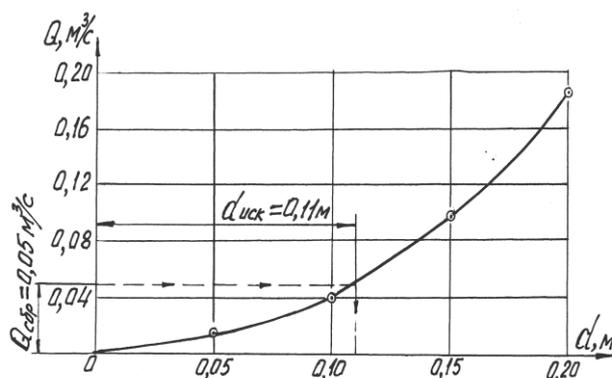


Рис. 4.3.6. График $Q = f(d)$ для определения диаметра $d_{иск}$ сбросной трубы

Задача 4.3.5. Из верхнего герметично закрытого резервуара в открытый нижний (рис. 4.3.7) по вертикальной трубе переменного диаметра подается вода. Разность уровней воды в резервуарах постоянная и составляет $H = 2,0$ м. В верхнем резервуаре давление манометрическое $p_{0\text{ман}} = 20$ кПа. На свободной поверхности воды в нижнем резервуаре давление атмосферное – $p_{\text{ат}}$. Диаметры труб: $d_1 = 0,05$ м; $d_2 = 0,075$ м; $d_3 = 0,040$ м.

Определить, учитывая только местные потери напора, расход воды Q в трубопроводе и избыточное давление $p_{\text{изб}}$ в сечении на высоте $h = 1,0$ м от уровня воды в нижнем резервуаре.

Решение. Для определения расхода воды Q применим уравнение Д. Бернулли к сечениям I-I и II-II (рис. 4.3.7), совпадающим с уровнями воды в резервуарах. Плоскость сравнения совместим с сечением II-II. Выбор этих сечений очевиден, поскольку именно в них известно наибольшее число слагаемых трехчлена ($z + p / \rho g + \alpha v^2 / 2g$) уравнения (4.4):

$$\begin{aligned} z_1 &= H; p_{1\text{изб}} / \rho g = p_{\text{ман}} / \rho g; \alpha_1 v_1^2 / 2g \approx 0; \\ z_2 &= 0; p_{2\text{изб}} / \rho g = 0; \alpha_2 v_2^2 / 2g \approx 0; \\ h_{\text{VI-II}} &= h_{\text{ex}} + h_{\text{p.p}} + h_{\text{p.c}} + h_{\text{вых}}. \end{aligned}$$

Скоростные напоры приняты равными нулю ввиду того, что площади зеркал воды в резервуарах во много раз превышают площади поперечных сечений трубы.

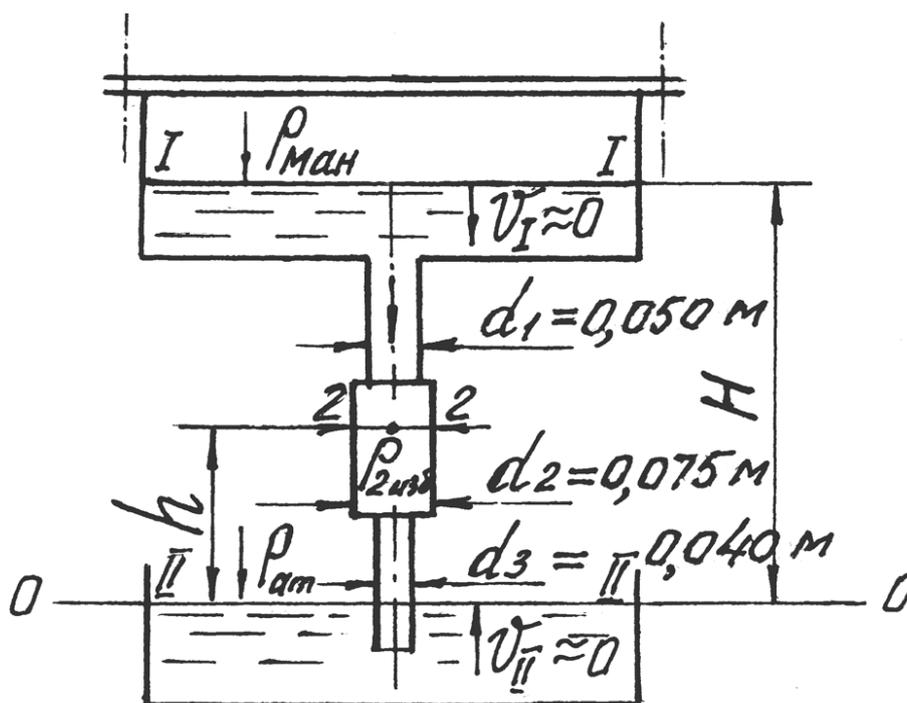


Рис. 4.3.7. Расчетная схема к определению расхода воды Q и избыточного давления $p_{\text{изб}}$ в сечении II-II

Выразив потери напора в местных сопротивлениях (на входе, при резком расширении и резком сужении трубопровода, а также на выходе) по формуле Вейсбаха (см. уравнение (4.12)) и учитывая уравнение баланса расхода (см. формулу (4.6)), напомним уравнение Д. Бернулли в виде

$$H + \frac{p_{ман}}{\rho g} = \frac{\alpha \cdot Q^2}{2g} \left(\frac{\zeta_{вх}}{\omega_1^2} + \frac{\zeta_{p.p}}{\omega_2^2} + \frac{\zeta_{p.c}}{\omega_3^2} + \frac{\zeta_{вых}}{\omega_3^2} \right). \quad (4.32)$$

Приняв $\alpha = 1,0$ и решив уравнение (4.32) относительно Q , получим выражение

$$Q = \sqrt{2g \left(H + \frac{p_{ман}}{\rho g} \right) \frac{1}{\sqrt{\frac{\zeta_{вх}}{\omega_1^2} + \frac{\zeta_{p.p}}{\omega_2^2} + \frac{\zeta_{p.c}}{\omega_3^2} + \frac{\zeta_{вых}}{\omega_3^2}}}}, \quad (4.33)$$

которым и воспользуемся для вычисления расхода воды.

Предварительно найдем площади поперечных сечений трубы, а в прилож. 6 найдем числовые значения коэффициентов местных сопротивлений. Получим $\omega_1 = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $\omega_2 = 4,42 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $\omega_3 = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $\zeta_{вх} = 0,50$; $\zeta_{p.p} = 1,56$; $\zeta_{p.c} = 0,36$; $\zeta_{вых} = 1,00$.

Подставив числовые значения величин в выражение (4.33), вычислим расход воды:

$$\begin{aligned} Q &= \sqrt{2 \cdot 9,81 \left(2,0 + \frac{20000}{1000 \cdot 9,81} \right) \frac{1}{\sqrt{\frac{0,50}{(1,96 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{1,56}{(4,42 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{0,30}{(1,26 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{1,00}{(1,26 \cdot 10^{-3})^2}}}} = \\ &= \sqrt{79,26} \cdot \frac{1}{\sqrt{130154 + 79851 + 226757 + 629882}} = \frac{8,90}{1033} = 0,0086 \text{ м}^3/\text{с}. \end{aligned}$$

Для определения избыточного давления ризб в сечении 2-2 трубы напомним уравнение Д. Бернулли для сечений 2-2 и II-II (см. рис. 4.3.7) при ранее принятой плоскости сравнения:

$$h + \frac{p_{2изб}}{\rho g} + \frac{Q^2}{2g\omega_2^2} = \frac{\zeta_{p.c} \cdot Q^2}{2g\omega_3^2} + \frac{\zeta_{вых} \cdot Q^2}{2g\omega_3^2}. \quad (4.34)$$

Решив уравнение (4.34) относительно $p_{2изб}$, получим зависимость

$$p_{2изб} = \left[\frac{Q^2}{2g} \left(\frac{\zeta_{p.c}}{\omega_3^2} + \frac{\zeta_{вых}}{\omega_3^2} - \frac{1}{\omega_2^2} \right) - h \right] \rho g. \quad (4.35)$$

После подстановки числовых данных в выражение (4.35) найдем избыточное давление в сечении 2-2 трубы:

$$\begin{aligned} p_{2изб} &= \left[\frac{0,0086^2}{2 \cdot 9,81} \left(\frac{0,36}{(1,26 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{1}{(1,26 \cdot 10^{-3})^2} - \frac{1}{(4,42 \cdot 10^{-3})^2} \right) - 1 \right] \cdot 1000 \cdot 9,81 = \\ &= (3,77 \cdot 10^{-6} \cdot 907826 - 1,0) \cdot 9810 = 23838 \text{ Па} = 23,84 \text{ кПа}. \end{aligned}$$

4.4. Задачи для самостоятельного решения

Задача 4.4.1А. По напорному трубопроводу, снабженному расходомером Вентури, протекает расход Q жидкости плотностью ρ (рис. 4.4.1). Диаметр трубопровода – d_1 , диаметр горловины расходомера – d_2 . К горловине присоединена трубка, нижний конец которой опущен в открытый резервуар. Высота подъема жидкости в трубке – h . Манометрическое давление в трубопроводе перед расходомером – $P_{1ман}$.

Пренебрегая потерями напора, определить диаметр горловины d_2 при данных, приведенных в табл. 4.1.1.

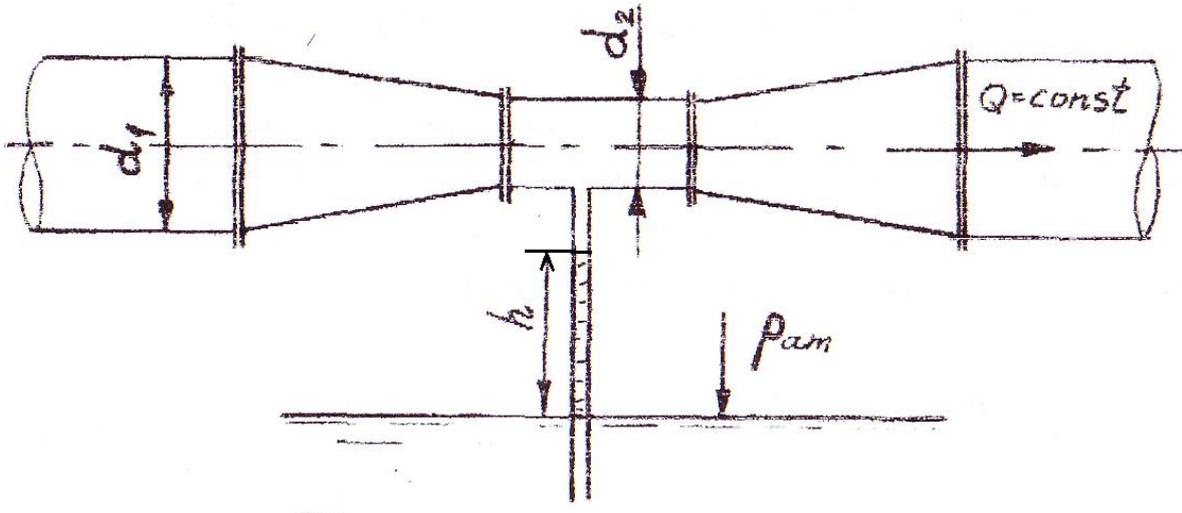


Рис. 4.4.1. К задачам 4.4.1А, Б, В

Таблица 4.4.1

№ варианта	Q , м ³ /с	h , м	d_1 , м	ρ , кг/м ³	$P_{1ман}$, кПа
1	0,008	0,3	0,05	1000	5,0
2	0,007			1100	4,0
3	0,006	0,25		900	3,0
4	0,005	0,2		1000	2,0
5	0,004	0,25			1,0
6	0,003				0,5

Задача 4.4.1Б. По напорному трубопроводу, снабженному расходомером Вентури, протекает расход Q жидкости плотностью ρ (см. рис. 4.4.1). Диаметр трубопровода – d_1 , диаметр горловины расходомера – d_2 . К горловине присоединена трубка, нижний конец которой опущен в открытый резервуар. Высота подъема жидкости в трубке – h . Манометрическое давление в трубопроводе перед расходомером – $P_{1ман}$.

Пренебрегая потерями напора, определить высоту h , на которую поднимется жидкость в трубке, при данных, приведенных в табл. 4.4.2.

Таблица 4.4.2

№ варианта	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$d_1, \text{ м}$	$d_2, \text{ м}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$P_{1\text{ман}}, \text{ кПа}$
1	0,025	0,1	0,05	1000	49,0
2	0,020	0,075	0,04	1100	40,0
3	0,015	0,070	0,04	1200	35,0
4	0,010	0,060	0,035	900	30,0
5			0,030	800	25,0
6	0,008			1000	35,0

Задача 4.4.1В. По напорному трубопроводу, снабженному расходомером Вентурии, протекает расход Q жидкости плотностью ρ (см. рис. 4.4.1). Диаметр трубопровода d_1 , диаметр горловины расходомера d_2 . К горловине присоединена трубка, нижний конец которой опущен в открытый резервуар. Высота подъема жидкости в трубке – h .

Пренебрегая потерями напора, определить расход Q при данных, приведенных в табл. 4.4.3.

Таблица 4.4.3

№ варианта	$h, \text{ м}$	$d_1, \text{ м}$	$d_2, \text{ м}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$
1	0,20	0,1	0,05	1000
2	0,25		0,05	
3	0,30		0,05	
4	0,50		0,04	
5	1,00		0,03	
6	2,25		0,03	

Задача 4.4.2А. По горизонтальному трубопроводу переменного диаметра (рис. 4.4.2) протекает расход воды Q . Глубина воды в открытом напорном баке – H . Длины участков трубопровода одинаковы, а диаметры – d_1, d_2, d_3 . Истечение воды происходит в атмосферу.

Пренебрегая потерями напора, построить график напоров и определить расход воды Q при данных, приведенных в табл. 4.4.4.

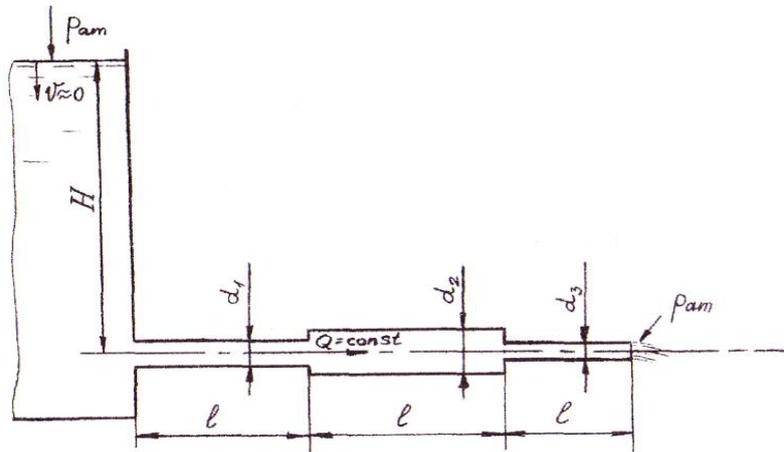


Рис. 4.4.2. К задачам 4.4.2А, Б, В

Таблица 4.4.4

№ варианта	d_1 , м	d_2 , м	d_3 , м	H , м
1	0,015	0,020	0,010	50
2	0,020	0,025	0,015	45
3	0,025	0,030	0,020	40
4	0,030	0,035	0,025	35
5	0,035	0,040	0,030	30
6	0,040	0,050	0,030	25

Задача 4.4.2Б. По горизонтальному трубопроводу переменного диаметра (см. рис. 4.4.2) протекает расход воды Q . Глубина воды в открытом напорном баке – H . Длины участков трубопровода одинаковы, а диаметры – d_1, d_2, d_3 . Истечение воды происходит в атмосферу.

Пренебрегая потерями напора, построить график напоров и определить напор H при данных, приведенных в табл. 4.4.5.

Таблица 4.4.5

№ варианта	d_1 , м	d_2 , м	d_3 , м	Q , м ³ /с
1	0,015	0,020	0,010	50
2	0,020	0,025	0,015	45
3	0,025	0,030	0,020	40
4	0,030	0,035	0,025	35
5	0,035	0,040	0,030	30
6	0,040	0,050	0,030	25

Задача 4.4.2В. По горизонтальному трубопроводу переменного диаметра (см. рис. 4.4.2) протекает расход воды Q . Глубина воды в открытом напорном баке – H . Длины участков трубопровода одинаковы, а диаметры d_1, d_2, d_3 . Истечение воды происходит в атмосферу.

Пренебрегая потерями напора, построить график напоров и определить диаметр d_3 при данных, приведенных в табл. 4.4.6.

Таблица 4.4.6

№ варианта	d_1 , м	d_2 , м	H , м	Q , м ³ /с
1	0,015	0,020	10	0,002
2	0,020	0,025	15	0,003
3	0,025	0,030	20	0,006
4	0,030	0,035	25	0,010
5	0,035	0,040	30	0,015
6	0,040	0,050	30	0,020

Задача 4.4.3А. К герметично закрытому резервуару (рис. 4.4.3) присоединена постепенно расширяющаяся труба с диаметрами d_1 и d_2 .

Глубина воды в резервуаре – H , манометрическое давление на свободной поверхности воды – $P_{o\text{ ман}}$.

Пренебрегая потерями напора, определить глубину воды H в резервуаре при данных, приведенных в табл. 4.4.7.

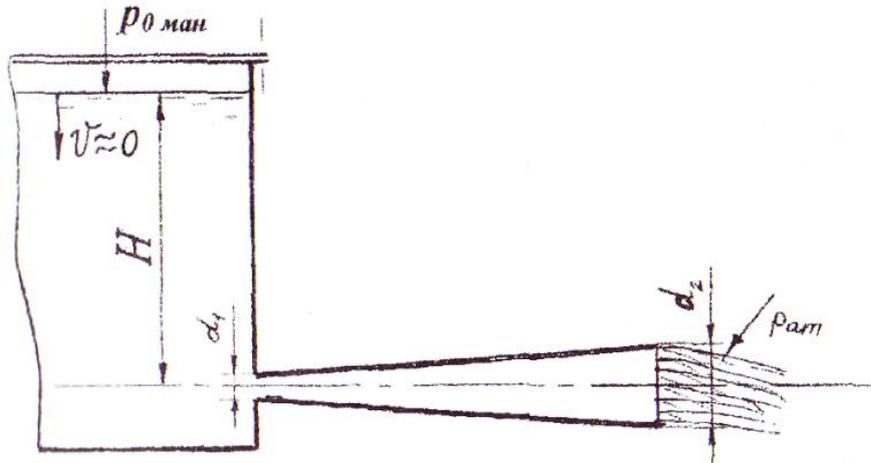


Рис. 4.4.3. К задачам 4.4.3А, Б, В

Таблица 4.4.7

№ варианта	$P_{0\text{ изб}}$, кПа	Q , м ³ /с	d_1 , м	d_2 , м
1	-49,0	0,020	0,040	0,050
2	-40,0	0,025	0,050	0,060
3	-35,0	0,030	0,060	0,070
4	-30,0	0,035	0,070	0,080
5	-25,0	0,040	0,080	0,090
6	-20,0	0,045	0,090	0,100

Задача 4.4.3Б. К герметично закрытому резервуару (см. рис. 4.4.3) присоединена постепенно расширяющаяся труба с диаметрами d_1 и d_2 . Глубина воды в резервуаре – H , манометрическое давление на свободной поверхности воды – $P_{o\text{ ман}}$.

Пренебрегая потерями напора, определить давление P_o при данных, приведенных в табл. 4.4.8.

Таблица 4.4.8

№ варианта	H , м	Q , м ³ /с	d_1 , м	d_2 , м
1	10	0,100	0,100	0,300
2	15	0,150		0,350
3	20	0,200		0,400
4	25	0,250		0,400
5	30	0,300		0,400
6	10	0,300		0,600

Задача 4.4.3В. К герметично закрытому резервуару (см. рис. 4.4.3) присоединена постепенно расширяющаяся труба с диаметрами d_1 и d_2 . Глубина воды в резервуаре – H , манометрическое давление на свободной поверхности воды – $P_{o\text{ ман}}$.

Пренебрегая потерями напора, определить расход воды Q при данных, приведенных в табл. 4.4.9.

Таблица 4.4.9

№ варианта	H , м	$p_{o\text{ ман}}$, кПа	d_1 , м	d_2 , м
1	10	10	0,100	0,300
2	15	15		0,350
3	20	20		0,400
4	25	25		0,400
5	30	30		0,600
6	10			0,600

Задача 4.4.4А. По всасывающему трубопроводу диаметром d (рис. 4.4.4) из открытого колодца центробежным насосом забирается расход воды Q . Высота установки насоса – H_{bc} . Перед входом в насос вакуумметрическое давление – $P_{\text{вак}}$.

Пренебрегая потерями напора, определить вакуумметрическое давление $P_{\text{вак}}$ перед входом в насос при данных, приведенных в табл. 4.4.10.

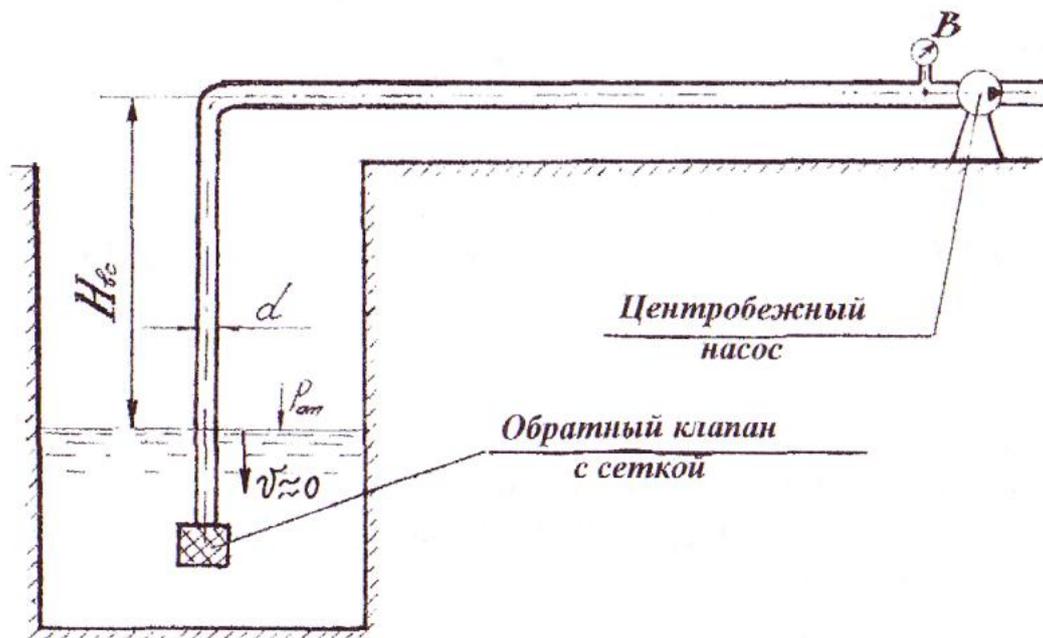


Рис. 4.4.4. К задачам 4.4.4А, Б, В

Таблица 4.4.10

№ варианта	H_{bc} , м	Q , м ³ /ч	d , м
1	4,5	0,005	0,100
2	4,0	0,010	0,100
3	3,5	0,015	0,100
4	3,0	0,030	0,200
5	2,5	0,050	0,200
6	2,0	0,500	0,200

Задача 4.4.4Б. По всасывающему трубопроводу диаметром d (см. рис. 4.4.4) из открытого колодца центробежным насосом забирается расход воды Q . Высота установки насоса – H_{bc} . Перед входом в насос вакуумметрическое давление – $P_{вак}$.

Пренебрегая потерями напора, определить высоту установки H_{bc} насоса при данных, приведенных в табл. 4.4.11.

Таблица 4.4.11

№ варианта	$P_{вак}$, кПа	Q , м ³ /ч	d , м
1	60,0	0,0025	0,075
2	50,0		
3	40,0		
4		0,100	
5	35,0	0,250	0,100
6		0,500	

Задача 4.4.4В. По всасывающему трубопроводу диаметром d (см. рис. 4.4.4) из открытого колодца центробежным насосом забирается расход воды Q . Высота установки насоса – H_{bc} . Перед входом в насос вакуумметрическое давление – $P_{вак}$.

Пренебрегая потерями напора, определить расход воды Q при данных, приведенных в табл. 4.4.12.

Таблица 4.4.12

№ варианта	H_{bc} , м	$P_{вак}$, кПа	d , м
1	3,5	40,0	0,125
2	3,0	35,0	
3	2,5	30,0	
4	2,5	25,0	
5	3,0	30,0	
6	3,5	40,0	

Задача 4.4.5А. К герметично закрытому резервуару с манометрическим давлением $P_{o ман}$ присоединена горизонтальная труба диаметром d_1 (рис. 4.4.5), заканчивающаяся конически сходящейся

насадкой с диаметром выходного сечения d_2 . Истечение происходит в атмосферу. Глубина воды в резервуаре – H .

Пренебрегая потерями напора, построить график напоров и определить скорость движения воды в трубе V_1 и в выходном сечении насадки V_2 при данных, приведенных в табл. 4.4.13.

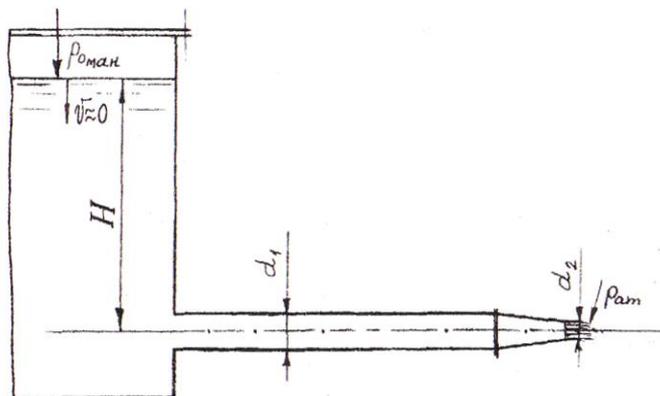


Рис. 4.4.5. К задачам 4.4.5А, Б, В

Таблица 4.4.13

№ варианта	d_1 , м	d_2 , м	$P_{0\text{ ман}}$, кПа	H , м
1	0,020	0,010	20	1,5
2	0,025	0,015	25	2,0
3	0,030	0,020	30	2,5
4	0,035	0,025	35	3,0
5	0,040	0,030	40	3,5
6	0,045	0,035	45	4,0

Задача 4.4.5Б. К герметично закрытому резервуару с манометрическим давлением $P_{0\text{ ман}}$ присоединена горизонтальная труба диаметром d_1 (см. рис. 4.4.5), заканчивающаяся конически сходящейся насадкой с диаметром выходного сечения d_2 . Истечение происходит в атмосферу. Глубина воды в резервуаре – H .

Пренебрегая потерями напора, построить график напоров и определить глубину воды H в резервуаре при данных, приведенных в табл. 4.4.14.

Таблица 4.4.14

№ варианта	Q , м ³ /с	d_1 , м	d_2 , м	$P_{0\text{ ман}}$, кПа
1	0,050	0,030	0,010	0
2	0,060	0,040	0,020	1
3	0,100	0,050	0,025	5
4	0,200	0,060	0,030	6
5	0,400	0,080	0,060	7
6	0,600	0,160	0,090	10

Задача 4.4.5В. К герметично закрытому резервуару с манометрическим давлением $P_{o,ман}$ присоединена горизонтальная труба диаметром d_1 (см. рис. 4.4.5), заканчивающаяся конически сходящейся насадкой с диаметром выходного сечения d_2 . Истечение происходит в атмосферу. Глубина воды в резервуаре – H .

Пренебрегая потерями напора, построить график напоров и определить диаметр d_2 выходного сечения насадки при данных, приведенных в табл. 4.4.15.

Таблица 4.4.15

№ варианта	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$d_1, \text{ м}$	$P_{o,ман}, \text{ кПа}$	$H, \text{ м}$
1	0,600	0,500	5	1,5
2	0,650		10	1,6
3	0,700		15	1,7
4	0,750		15	1,8
5	0,800		15	1,9
6	2,000		25	2,0

Задача 4.4.6А. Вертикальная труба диаметром d и длиной L (рис. 4.4.6) присоединена к открытому напорному баку, в котором глубина воды – h . Истечение из трубы происходит в атмосферу.

Пренебрегая потерями напора, определить расход воды Q , вытекающий из трубопровода, среднюю скорость V и избыточное давление P_b в точке B при данных, приведенных в табл. 4.4.16. Построить график напоров.

Указание. При построении графика напоров полные напоры в сечениях трубы откладывать от осевой линии трубы.

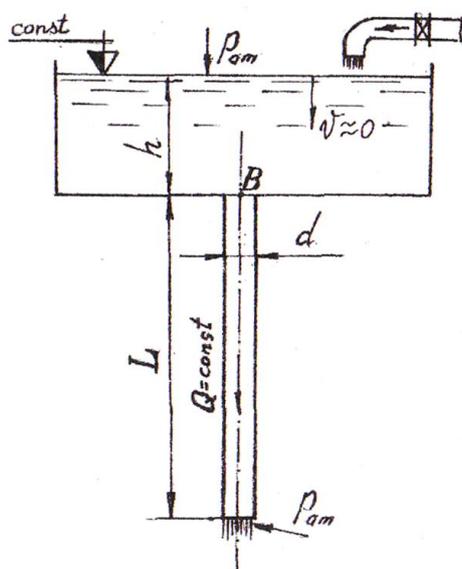


Рис. 4.4.6. К задачам 4.4.6А, Б, В

Таблица 4.4.16

№ варианта	d , м	h , м	L , м
1	0,100	2,0	4,00
2	0,150	2,5	5,00
3	0,200	3,0	6,00
4	0,250	3,5	7,00
5	0,300	4,0	8,00
6	0,350	4,5	9,00

Задача 4.4.6Б. Вертикальная труба диаметром d и длиной L (см. рис. 4.4.6) присоединена к открытому напорному баку, в котором глубина воды – h . Истечение из трубы происходит в атмосферу.

Пренебрегая потерями напора, определить глубину воды h в напорном баке и избыточное давление P_b в точке B при данных, приведенных в табл. 4.4.17. Построить график напоров.

Указание. При построении графика напоров полные напоры в сечениях трубы откладывать от осевой линии трубы.

Таблица 4.4.17

№ варианта	Q , м ³ /с	d , м	L , м
1	0,600	0,080	3,00
2	0,800	0,085	3,50
3	0,850	0,090	4,00
4	1,000	0,095	4,50
5	1,100	0,100	5,00
6	1,200	0,110	5,50

Задача 4.4.6В. Вертикальная труба диаметром d и длиной L (см. рис. 4.4.6) присоединена к открытому напорному баку, в котором глубина воды – h . Истечение из трубы происходит в атмосферу.

Пренебрегая потерями напора, определить диаметр трубы d и избыточное давление P_b в точке B при данных, приведенных в табл. 4.4.18.

Построить график напоров.

Указание. При построении графика напоров полные напоры в сечениях трубы откладывать от осевой линии трубы.

Таблица 4.4.18

№ варианта	Q , м ³ /с	h , м	L , м
1	1,000	3,0	5,0
2	1,100	2,5	4,5
3	1,200	2,0	4,0
4	1,300	1,5	3,5
5	1,400	2,0	3,0
6	1,500	2,5	3,0

Задача 4.4.7. По напорным трубопроводам A и B одинакового диаметра d (рис. 4.4.7) подается вода. К трубопроводам присоединен дифференциальный ртутный манометр, показание которого – h_{pm} . Расход воды в трубопроводах A и B составляет Q_a и Q_b соответственно. Полные удельные энергии (полные напоры) в трубопроводах одинаковы.

Определить скорости движения воды в трубопроводах V_a и V_b , а также Q_a .

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 4.4.19.

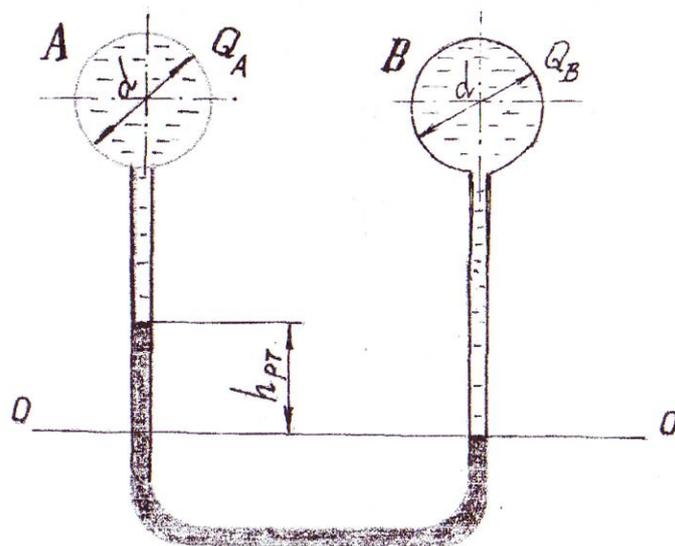


Рис. 4.4.7. К задаче 4.4.7

Таблица 4.4.19

№ варианта	$Q_b, \text{ м}^3/\text{с}$	$d, \text{ м}$	$h_{pm}, \text{ м}$
1	0,0012	0,100	0,010
2	0,010	0,110	0,018
3	0,0015	0,120	0,019
4	0,050	0,150	0,020
5	0,100	0,200	0,022
6	0,150	0,250	0,025

Задача 4.4.8А. Из герметично закрытого резервуара (рис. 4.4.8) по наклонному трубопроводу переменного сечения с диаметрами d_1, d_2, d_3 и длинами участков l_1, l_2, l_3 соответственно вытекает в атмосферу вода. Угол наклона трубопровода к горизонту – α , в резервуаре – P_o изб., глубина воды – H .

Пренебрегая потерями напора, построить график напоров и определить расход воды Q , вытекающий из трубопровода, при данных, приведенных в табл. 4.4.20.

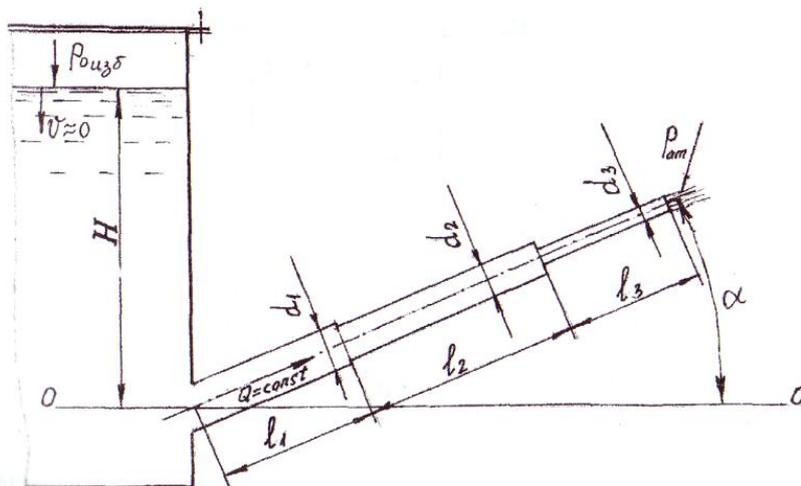


Рис. 4.4.8. К задачам 4.4.8А, Б, В

Таблица 4.4.20

№ варианта	$P_{o \text{ изб.}}$, кПа	α°	d_1 , м	d_2 , м	d_3 , м	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	H , м
1	15	15	0,020	0,015	0,010	5	3	1	5
2	10	14	0,100	0,125	0,100	6	4	2	10
3	12	12	0,100	0,125	0,100	7	5	2	9
4	8	13	0,120	0,125	0,110	7	5	3	8
5	8	18	0,150	0,175	0,140	10	6	8	8
6	12	17	0,150	0,175	0,140	10	12	14	10

Задача 4.4.8Б. Из герметично закрытого резервуара (см. рис. 4.4.8) по наклонному трубопроводу переменного сечения с диаметрами d_1 , d_2 , d_3 и длинами участков l_1 , l_2 , l_3 соответственно вытекает в атмосферу вода. Угол наклона трубопровода к горизонту – α , в резервуаре – $P_{o \text{ изб.}}$, глубина воды – H .

Пренебрегая потерями напора, построить график напоров и определить внешнее избыточное давление $P_{o \text{ изб.}}$ при данных, приведенных в табл. 4.4.21.

Таблица 4.4.21

№ варианта	α°	d_1 , м	d_2 , м	d_3 , м	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	H , м	Q , м ³ /с
1	30	0,050	0,075	0,050	4,0	4,0	1,0	5,0	0,010
2	25	0,050	0,075	0,050	4,0	3,0	2,0	4,5	0,010
3	24	0,060	0,075	0,055	4,0	3,0	4,0	4,0	0,011
4	23	0,060	0,075	0,060	4,0	4,0	4,0	3,5	0,012
5	22	0,070	0,075	0,065	5,0	4,0	5,0	3,0	0,013
6	30	0,080	0,090	0,070	5,0	6,0	5,0	2,5	0,014

Задача 4.4.8В. Из герметично закрытого резервуара (см. рис. 4.4.8) по наклонному трубопроводу переменного сечения с диаметрами d_1 , d_2 , d_3 и длинами участков l_1 , l_2 , l_3 соответственно вытекает в атмосферу вода. Угол наклона трубопровода к горизонту – α , в резервуаре – $P_{o\text{ изб}}$, глубина воды – H .

Пренебрегая потерями напора, построить график напоров и определить диаметр d_1 при данных, приведенных в табл. 4.4.22.

Таблица 4.4.22

№ варианта	$P_{o\text{ изб}}$, кПа	α°	d_2 , м	d_3 , м	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	H , м	Q , м ³ /с
1	8,0	30	0,075	0,050	4	4	1	5,0	0,010
2	6,0	25			4	3	2	4,5	
3	15,0	24			4		4	4,0	
4	20,5	23			4		4	3,5	
5	29,0	22			5	4	5	3,0	
6	30,0	18	0,090	0,070	5	6	5	2,5	0,014

Задача 4.4.9А. Жидкость сливается из герметично закрытой цистерны в открытый резервуар по трубе диаметром d (рис. 4.4.9), на которой установлен полностью открытый вентиль и имеется колено без закругления с поворотом на 90° .

Превышение уровня жидкости в цистерне над осью горизонтальной части трубы – H_1 . Внешнее избыточное давление в цистерне – $P_{o\text{ изб}}$. Плотность жидкости – ρ .

Учитывая потери напора только в местных сопротивлениях, определить расход Q жидкости при данных, приведенных в табл. 4.4.23.

Таблица 4.4.23

№ варианта	H_1 , м	$P_{o\text{ изб}}$, кПа	d , м	ρ , кг/м ³
1	1,5	–10,0	0,050	750
2	2,0	–15,0	0,055	800
3	2,5	–20,0	0,060	850
4	3,0	–25,0	0,065	900
5	3,5	–30,0	0,070	950
6	4,0	–35,0	0,075	1000

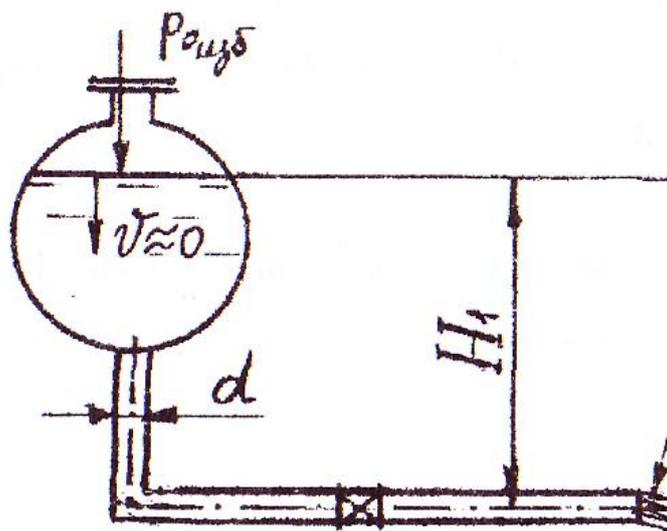


Рис. 4.4.9. К задачам 4.4.9А, Б, В

Задача 4.4.9Б. Жидкость сливается из герметично закрытой цистерны в открытый резервуар по трубе диаметром d (см. рис. 4.4.9), на которой установлен полностью открытый вентиль и имеется колено без закругления с поворотом на 90° . Превышение уровня жидкости в цистерне над осью горизонтальной части трубы – H_1 . Внешнее избыточное давление в цистерне – $P_{o\text{ изб}}$. Плотность жидкости – ρ .

Учитывая потери напора только в местных сопротивлениях, определить внешнее избыточное давление $P_{o\text{ изб}}$ при данных, приведенных в табл. 4.4.24.

Таблица 4.4.24

№ варианта	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$H_1, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$
1	0,010	2,0	0,075	1000
2	0,011	2,5	0,080	950
3	0,015	3,0	0,100	900
4	0,020	3,5	0,100	850
5	0,030	4,0	0,150	800
6	0,050	4,5	0,200	750

Задача 4.4.9В. Жидкость сливается из герметично закрытой цистерны в открытый резервуар по трубе диаметром d (см. рис. 4.4.9), на которой установлен полностью открытый вентиль и имеется колено без закругления с поворотом на 90° . Превышение уровня жидкости в цистерне над осью горизонтальной части трубы – H_1 . Внешнее избыточное давление в цистерне – $P_{o\text{ изб}}$. Плотность жидкости – ρ .

Учитывая потери напора только в местных сопротивлениях, определить диаметр трубы d при данных, приведенных в табл. 4.4.25.

Таблица 4.4.25

№ варианта	Q , м ³ /с	H_1 , м	ρ , кг/м ³	$P_{o\text{ изб}}$, кПа
1	0,007	1,0	850	10,0
2	0,010	2,0	900	15,0
3	0,010	2,0	900	-15,0
4	0,020	3,0	950	20,0
5	0,020	3,0	950	-20,0
6	0,030	4,0	1000	25,0

Задача 4.4.10А. Из герметично закрытого напорного бака через стальную трубу ($\Delta\varepsilon = 0,50$ мм) диаметром d и длиной l в атмосферу вытекает вода, расход которой – Q (рис. 4.4.10). На трубе установлен пробковый кран с углом открытия – α . Давление на поверхности воды в баке характеризуется показанием $h_{рт}$ ртутного манометра. Превышение уровня воды в баке над уровнем ртути в его левом колене – H_1 . Глубина воды в баке – H_b .

Полагая работу трубы в области квадратичного сопротивления, определить расход воды Q при данных, приведенных в табл. 4.4.26.

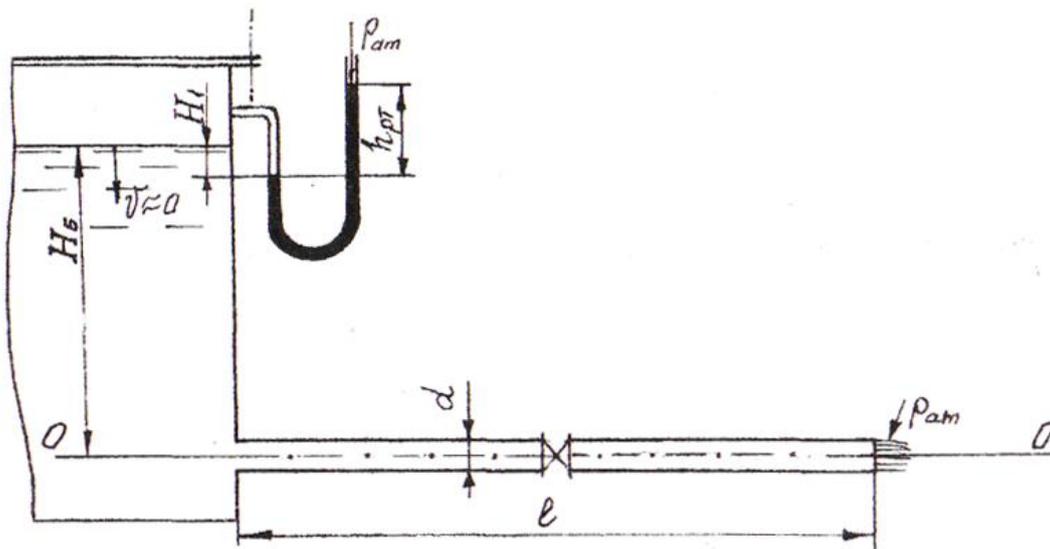


Рис. 4.4.10. К задачам 4.4.10А, Б, В

Таблица 4.4.26

№ варианта	$h_{рт}$, м	H_b , м	l , м	d , м	α°
1	1,47	2,0	2,0	0,040	5
2	1,2	2,5	3,0	0,050	10
3	1,1	3,0	4,0	0,060	20
4	1,0	3,5	5,0	0,070	30
5	0,9	4,0	6,0	0,080	40
6	0,8	4,5	7,0	0,090	50

Задача 4.4.10Б. Из герметично закрытого напорного бака через стальную трубу ($\Delta\varepsilon = 0,50$ мм) диаметром d и длиной l в атмосферу вытекает вода, расход которой – Q (см. рис. 4.4.10). На трубе установлен пробковый кран с углом открытия α . Давление на поверхности воды в баке характеризуется показанием h_{pm} ртутного манометра. Глубина воды в баке – H_b .

Полагая работу трубы в области квадратичного сопротивления, определить глубину H_b воды в баке при данных, приведенных в табл. 4.4.27.

Таблица 4.4.27

№ варианта	h_{pm} , м	Q , м ³ /с	l , м	d , м	α°
1	1,5	0,010	2,0	0,040	5
2	1,2	0,010	3,0	0,050	10
3	1,10	0,015	4,0	0,060	20
4	1,00	0,020	5,0	0,080	30
5	0,90	0,020	6,0	0,100	40
6	0,80	0,025	7,0	0,150	50

Задача 4.4.10В. Из герметично закрытого напорного бака через стальную трубу ($\Delta\varepsilon = 0,50$ мм) диаметром d и длиной l в атмосферу вытекает вода, расход которой – Q (см. рис. 4.4.10). На трубе установлен пробковый кран с углом открытия α . Давление на поверхности воды в баке характеризуется показанием h_{pm} ртутного манометра. Глубина воды в баке – H_b .

Полагая работу трубы в области квадратичного сопротивления, определить диаметр d трубы при данных, приведенных в табл. 4.4.28.

Таблица 4.4.28

№ варианта	Q , м ³ /с	h_{pm} , м	H_b , м	l , м	α°
1	0,050	0,80	2,5	4,0	20
2	0,060	0,70	2,0	5,0	10
3	0,070	0,60	1,5	6,0	30
4	0,080	0,50	1,0	7,0	40
5	0,090	0,90	3,0	8,0	50
6	0,100	1,00	2,5	10,0	10

Задача 4.4.11А. Из герметично закрытого напорного бака, где внешнее избыточное давление $P_{o\text{ изб}}$ (рис. 4.4.11) в открытый резервуар перетекает вода по трубе диаметром d и длиной l с вентилям, который открыт полностью. Глубина воды в напорном баке – H_1 , а в открытом резервуаре – H_2 . Труба чугунная ($\Delta\varepsilon = 1,00$ мм), работает в области квадратичного сопротивления.

Определить избыточное давление $p_{0изб}$ и потери напора по длине и местные h_{w1-2} при данных, приведенных в табл. 4.4.29.

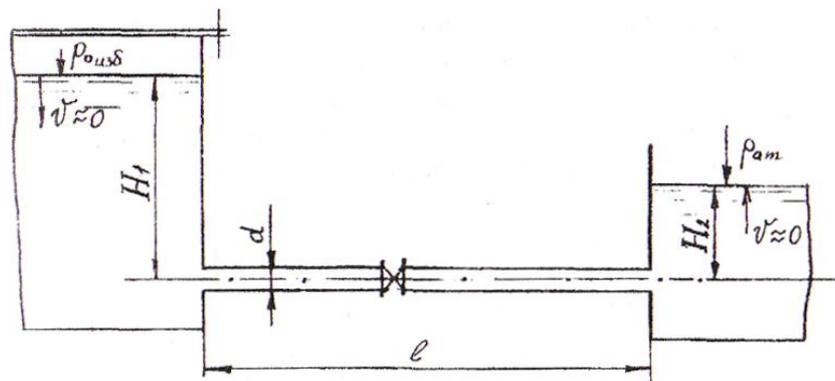


Рис. 4.4.11. К задачам 4.4.11А, Б, В

Таблица 4.4.29

№ варианта	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$d, \text{ м}$	$H_1, \text{ м}$	$H_2, \text{ м}$	$l, \text{ м}$
1	0,009	0,050	1,0	3,0	10,0
2	0,010	0,080	5,0	2,0	30,0
3	0,030	0,100	6,0	4,0	40,0
4	0,040	0,150	5,0	7,0	50,0
5	0,050	0,200	8,0	10,0	60,0
6	0,100	0,200	7,0	9,0	90,0

Задача 4.4.11Б. Из герметично закрытого напорного бака, где внешнее избыточное давление $P_{0изб}$ (см. рис. 4.4.11) в открытый резервуар перетекает вода по трубе диаметром d и длиной l с вентиля, который открыт полностью. Глубина воды в напорном баке – H_1 , а в открытом резервуаре – H_2 . Труба чугунная ($\Delta\varepsilon = 1,00 \text{ мм}$), работает в области квадратичного сопротивления.

Учесть потери напора по длине и местные.

Определить расход воды Q при данных, приведенных в табл. 4.4.30.

Таблица 4.4.30

№ варианта	$P_{0изб}, \text{ кПа}$	$d, \text{ м}$	$H_1, \text{ м}$	$H_2, \text{ м}$	$l, \text{ м}$
1	150	0,075	1,5	2,5	15,0
2	200	0,040	0,5	1,5	5,0
3	140	0,080	2	3	10,0
4	130	0,100	3	4	20,0
5	120	0,150	4	5	25,0
6	100	0,200	5	6	30,0

Задача 4.4.11В. Из герметично закрытого напорного бака, где внешнее избыточное давление $P_{0изб}$ (см. рис. 4.4.11) в открытый резервуар перетекает вода по трубе диаметром d и длиной l с вентиля, который

открыт полностью. Глубина воды в напорном баке – H_1 , а в открытом резервуаре – H_2 . Труба чугунная ($\Delta\varepsilon = 1,00$ мм), работает в области квадратичного сопротивления.

Учесть потери напора по длине и местные.

Определить диаметр трубы d .

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 4.4.31.

Таблица 4.4.31

№ варианта	Q , м ³ /с	$P_{o\text{ изб}}$, кПа	H_1 , м	H_2 , м	l , м
1	0,010	160	2,0	2,0	10
2	0,015	150	3,0	4,0	15
3	0,020	140	4,0	5,0	20
4	0,025	130	5,0	6,0	25
5	0,030	120	6,0	7,0	30
6	0,035	110	7,0	8,0	35

Задача 4.4.12А. Центробежный насос (рис. 4.4.12) подает воду с температурой $t = 10$ °С по стальной заржавленной умеренно трубе диаметром d и длиной l_n при геометрической высоте нагнетания h_n . Манометрическое давление в сечении 1-1 – $P_{1\text{ ман}}$.

Принимая во внимание только потери напора по длине и полагая работу трубопровода в области квадратичного сопротивления, определить расход воды Q в трубопроводе при данных, приведенных в табл. 4.4.32.

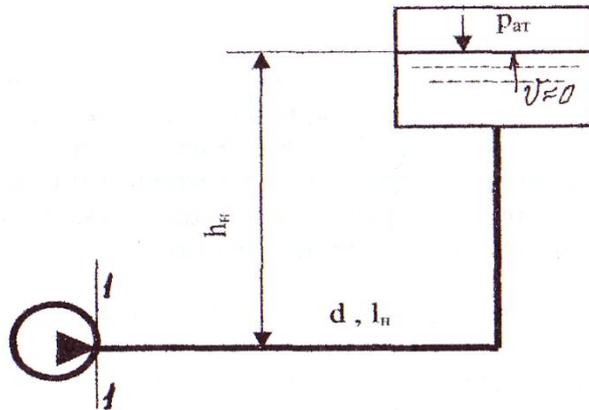


Рис. 4.4.12. К задачам 4.4.12А, Б, В

Таблица 4.4.32

№ варианта	$P_{1\text{ ман}}$, кПа	d , м	l_n , м	h_n , м
1	300	0,125	27,0	30,0
2	350	0,150	30,0	35,0
3	400	0,200	35,0	40,0
4	450	0,225	40,0	45,0
5	500	0,250	45,0	40,0
6	550	0,275	50,0	55,0

Задача 4.4.12Б. Центробежный насос (см. рис. 4.4.12) подает воду с температурой $t = 10^\circ \text{C}$ по стальной умеренно заржавленной трубе диаметром d и длиной l_n при геометрической высоте нагнетания h_H . Манометрическое давление в сечении 1-1 – $P_{1 \text{ ман}}$.

Принимая во внимание только потери напора по длине и полагая работу трубопровода в области квадратичного сопротивления, определить манометрическое давление в сечении 1-1 $P_{1 \text{ ман}}$ при данных, приведенных в табл. 4.4.33.

Таблица 4.4.33

№ варианта	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$d, \text{ м}$	$l_H, \text{ м}$	$h_H, \text{ м}$
1	0,016	0,150	37,0	40,0
2	0,020	0,175	40,0	45,0
3	0,025	0,200	45,0	50,0
4	0,030	0,225	50,0	55,0
5	0,035	0,250	55,0	60,0
6	0,040	0,275	60,0	65,0

Задача 4.4.12В. Центробежный насос (см. рис. 4.4.12) подает воду с температурой $t = 10^\circ \text{C}$ по стальной заржавленной умеренно трубе диаметром d и длиной l_n при геометрической высоте нагнетания h_H . Манометрическое давление в сечении 1-1 – $P_{1 \text{ ман}}$.

Принимая во внимание только потери напора по длине и полагая работу трубопровода в области квадратичного сопротивления, определить стандартный диаметр d трубопровода при данных, приведенных в табл. 4.4.34.

Таблица 4.4.34

№ варианта	$P_{1 \text{ ман}}, \text{ кПа}$	$l_H, \text{ м}$	$h_H, \text{ м}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$
1	230	20,0	23,0	0,011
2	300	205,0	30,0	0,015
3	350	30,0	35,0	0,020
4	400	35,0	40,0	0,025
5	450	40,0	45,0	0,030
6	500	45,0	50,0	0,035

Задача 4.4.13А. По трубопроводу, состоящему из двух участков длиной l_1 и l_2 с диаметрами d_1 и d_2 (рис. 4.4.13), в атмосферу вытекает вода. Угол наклона трубопровода к горизонту – α . Трубопровод присоединен к герметично закрытому напорному баку с постоянным уровнем воды. Внешнее избыточное давление в баке – $P_{o \text{ изб}}$. Превышение уровня воды в баке над входом в трубопровод – H .

Полагая работу трубопровода в области квадратичного сопротивления, построить график напоров и определить расход воды Q в трубопроводе при данных, приведенных в табл. 4.4.35 (трубы чугунные новые).

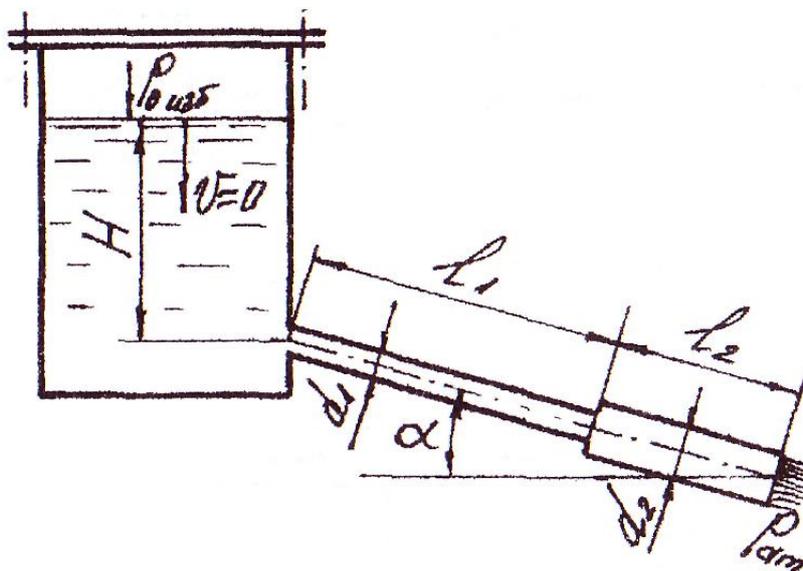


Рис. 4.4.13. К задачам 4.4.13А, Б, В

Таблица 4.4.35

№ варианта	H , м	$P_{o\text{ изб.}}$, кПа	l_1 , м	l_2 , м	d_1 , м	d_2 , м	α°
1	1	50	50	40	0,100	0,125	10
2	2	55	55	45	0,125	0,150	12
3	3	60	60	55	0,150	0,175	14
4	4	65	65	60	0,175	0,200	16
5	5	70	70	65	0,200	0,225	18
6	6	75	75	70	0,225	0,250	20

Задача 4.4.13Б. По трубопроводу, состоящему из двух участков длиной l_1 и l_2 , с диаметрами d_1 и d_2 (см. рис. 4.4.13), в атмосферу вытекает вода. Угол наклона трубопровода к горизонту – α . Трубопровод присоединен к герметично закрытому напорному баку с постоянным уровнем воды. Внешнее избыточное давление в баке – $P_{o\text{ изб.}}$. Превышение уровня воды в баке над входом в трубопровод – H .

Полагая работу трубопровода в области квадратичного сопротивления, построить график напоров и определить диаметр d_2 труб на втором участке трубопровода при данных, приведенных в табл. 4.4.36 (трубы стальные, заржавленные умеренно).

Таблица 4.4.36

№ варианта	H , м	Q , м ³ /с	$p_{0\text{изб}}$, кПа	l_1 , м	l_2 , м	d_1 , м	α , град
1	1	0,020	-10	40	40	0,075	20
2	2	0,050				0,100	
3	3						
4	4	0,070	-15	45	50	0,125	17
5	5		-10	40	40		16
6	6	0,080	-30	40	70		14

Задача 4.4.13. Вариант В. По трубопроводу, состоящему из двух участков длиной l_1 и l_2 с диаметрами d_1 и d_2 (см. рис. 4.4.13), в атмосферу вытекает вода. Угол наклона трубопровода к горизонту – α . Трубопровод присоединен к герметично закрытому напорному баку с постоянным уровнем воды. Внешнее избыточное давление в баке – $P_{o\text{изб}}$. Превышение уровня воды в баке над входом в трубопровод – H .

Полагая работу трубопровода в области квадратичного сопротивления, построить график напоров и определить внешнее избыточное давление $P_{o\text{изб}}$ при данных, приведенных в табл. 4.4.37 (трубы оцинкованные стальные, бывшие в эксплуатации).

Таблица 4.4.37

№ варианта	H , м	Q , м ³ /с	l_1 , м	l_2 , м	d_1 , м	d_2 , м	α°
1	2,0	0,015	80	60	0,1	0,15	30
2	3,0	0,060	85	65	0,1	0,15	25
3	3,0	0,070	90	70	0,1	0,15	20
4	4,0	0,075	95	85	0,125	0,15	15
5	5,0	0,080	95	60	0,125	0,175	10
6	6,0	0,090	95	95	0,150	0,175	5

Задача 4.4.14А. Вода перетекает из одного герметично закрытого резервуара в другой по трубопроводу переменного диаметра (рис. 4.4.14). Длины участков – l_1 и l_2 , диаметры труб – d_1 и d_2 . Превышение уровней воды в резервуарах над осью трубопровода – H_1 и H_2 . Избыточное давление на свободной поверхности воды в резервуарах – $P_{o1\text{изб}}$ и $P_{o2\text{изб}}$.

Считая работу трубопровода в области квадратичного сопротивления, построить график напоров и определить величину $P_{o1\text{изб}}$ при данных, приведенных в табл. 4.4.38 (чугунные трубы, бывшие в эксплуатации).

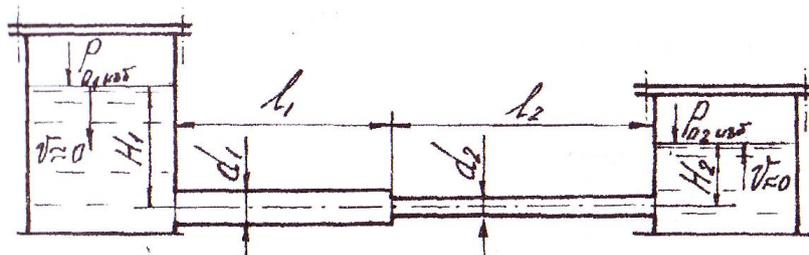


Рис. 4.4.14. Расчетная схема к задаче 4.4.14

Таблица 4.4.38

№ варианта	Q , м ³ /с	H_1 , м	H_2 , м	$P_{o2 \text{ изб}}$, кПа	l_1 , м	l_2 , м	d_1 , м	d_2 , м
1	0,020	2,0	1,0	15,0	40	45	0,150	0,100
2	0,025	4,0	2,0	20,0	45	55	0,150	0,125
3	0,030	4,0	3,0	25,0	50	55	0,175	0,150
4	0,035	5,0	4,0	30,0	55	60	0,200	0,175
5	0,040	6,0	5,0	35,0	60	65	0,225	0,200
6	0,050	7,0	5,0	15,0	65	70	0,250	0,200

Задача 4.4.14Б. Вода перетекает из одного герметично закрытого резервуара в другой по трубопроводу переменного диаметра (см. рис. 4.4.14). Длины участков – l_1 и l_2 , диаметры труб – d_1 и d_2 . Превышения уровней воды в резервуарах над осью трубопровода – H_1 и H_2 . Избыточное давление на свободной поверхности воды в резервуарах – $P_{o1 \text{ изб}}$ и $P_{o2 \text{ изб}}$.

Считая работу трубопровода в области квадратичного сопротивления, построить график напоров и определить величину Q при данных, приведенных в табл. 4.4.39 (стальные трубы после нескольких лет эксплуатации).

Таблица 4.4.39

№ варианта	H_1 , м	H_2 , м	$P_{o1 \text{ изб}}$, кПа	$P_{o2 \text{ изб}}$, кПа	l_1 , м	l_2 , м	d_1 , м	d_2 , м
1	3,0	1,0	45,0	20,0	20	30	0,150	0,100
2	4,0	2,0	50,0	25,0	25	35	0,175	0,125
3	5,0	2,0	55,0	25,0	30	40	0,175	0,150
4	5,0	3,0	55,0	30,0	35	40	0,200	0,150
5	5,0	4,0	55,0	35,0	40	40	0,200	0,175
6	6,0	4,0	60,0	45,0	50	40	0,225	0,200

Задача 4.4.14В. Вода перетекает из одного герметично закрытого резервуара в другой по трубопроводу переменного диаметра (см. рис. 4.4.14). Длины участков – l_1 и l_2 , диаметры труб – d_1 и d_2 . Превышения уровней воды в резервуарах над осью трубопровода – H_1 и H_2 . Избыточное давление на свободной поверхности воды в резервуарах – $P_{o1 \text{ изб}}$ и $P_{o2 \text{ изб}}$.

Считая работу трубопровода в области квадратичного сопротивления, построить график напоров и определить стандартный диаметр d_1 при данных, приведенных в табл. 4.4.40 (стальные трубы после одного года эксплуатации).

Таблица 4.4.40

№ варианта	Q , $\text{м}^3/\text{с}$	H_1 , м	H_2 , м	$P_{o1 \text{ изб}}$, кПа	$P_{o2 \text{ изб}}$, кПа	l_1 , м	l_2 , м	d_2 , м
1	0,030	2,0	1,0	42,0	18,0	25	40	0,125
2	0,035	3,0	1,0	45,0	20,0	30	45	0,125
3	0,040	3,0	2,0	50,0	25,0	45	45	0,150
4	0,050	4,0	3,0	55,0	35,0	70	85	0,175
5	0,060	5,0	3,0	55,0	50,0	75	85	0,200
6	0,100	6,0	3,0	61,0	52,0	85	95	0,225

Задача 4.4.15А. В закрытом резервуаре (рис. 4.4.15) на свободной поверхности воды с помощью сжатого воздуха поддерживается постоянное манометрическое давление $P_{o \text{ ман}}$, под действием которого по трубопроводу диаметром d (с длинами участков l_1 , l_2 , l_3) течет вода при температуре t °С.

Определить расход воды Q при данных, приведенных в табл. 4.4.41 (трубы новые бесшовные стальные).

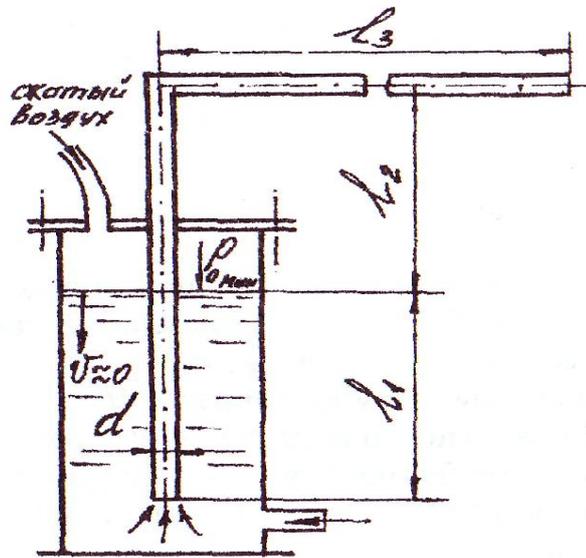


Рис. 4.4.15. Расчетная схема к задачам 4.4.15А, Б, В

Таблица 4.4.41

№ варианта	$P_{o \text{ ман}}$, кПа	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	d , м	t , °С
1	80	3	2	20	0,050	10
2	85	4	3	30	0,075	20
3	90	5	5	35	0,100	30
4	95	4	2	40	0,100	40
5	100	5	2	50	0,125	50
6	120	6	3	60	0,150	4

Задача 4.4.15Б. В закрытом резервуаре (см. рис. 4.4.15) на свободной поверхности воды с помощью сжатого воздуха поддерживается постоянное манометрическое давление $P_{o\text{ман}}$, под действием которого по трубопроводу диаметром d (с длинами участков l_1, l_2, l_3) течет вода при температуре t °С.

Определить манометрическое давление $P_{\text{ман}}$ в сечении трубопровода, совпадающем со свободной поверхностью воды в резервуаре, при данных, приведенных в табл. 4.4.42 (трубы оцинкованные стальные бывшие в эксплуатации).

Таблица 4.4.42

№ варианта	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$l_3, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$t, \text{ °С}$	$P_{o\text{ман}}, \text{ кПа}$
1	0,008	80	60	0,1	0,050	30	290
2	0,010	70	60	0,1	0,050	10	450
3	0,020	60	60	0,1	0,075	20	500
4	0,030	50	60	0,1	0,100	40	500
5	0,040	40	60	0,1	0,125	50	550
6	0,050	20	60	0,1	0,150	60	100

Задача 4.4.15В. В закрытом резервуаре (см. рис. 4.4.15) на свободной поверхности воды с помощью сжатого воздуха поддерживается постоянное манометрическое давление $P_{o\text{ман}}$, под действием которого по трубопроводу диаметром d (с длинами участков l_1, l_2, l_3) течет вода при температуре t °С.

Определить стандартный диаметр d трубопровода при данных, приведенных в табл. 4.4.43 (трубы новые бесшовные стальные).

Таблица 4.4.43

№ варианта	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$P_{o\text{ман}}, \text{ кПа}$	$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$l_3, \text{ м}$	$t, \text{ °С}$
1	0,010	100	3,0	3,0	2,5	20
2	0,015	110	4,0	4,0	4,0	10
3	0,020	120	4,0	5,0	6,0	30
4	0,030	130	5,0	6,0	7,0	20
5	0,040	140	5,0	7,0	8,0	40
6	0,050	150	5,0	10,0	15,0	50

5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОРОТКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

5.1. Основные типы задач и общие рекомендации по их решению

Коротким называют трубопровод, в котором местные потери напора соизмеримы с потерями напора по длине, т. е. являются величинами одного порядка, поэтому при гидравлическом расчете рассматриваемых трубопроводов вычисляют потери напора по длине и в каждом местном сопротивлении.

Короткий трубопровод может иметь постоянный диаметр по всей длине или же состоять из ряда последовательно соединенных участков разного диаметра. Короткими трубопроводами являются, например, всасывающие трубопроводы насосных установок, сифонные трубопроводы, дюкеры, донные водоспуски и дорожные трубы (трубопереезды).

Основные уравнения и зависимости, используемые при гидравлическом расчете коротких трубопроводов, рассмотрены в подпункте 4.1.

Наиболее часто встречающиеся в инженерной практике задачи при гидравлическом расчете коротких трубопроводов сведены к трем типам.

Задача I типа. Определить потребный напор $H_{нотр}$ (или давление p) в каком-либо живом сечении потока жидкости, если известны расход Q потока жидкости, род жидкости и ее температура, длины всех участков трубопровода l_i и внутренние диаметры труб d_i , материал, из которого изготовлены трубы, и состояние их внутренней поверхности.

Решение. Величину $H_{нотр}$ (или давление p) определяют прямой подстановкой в уравнение Д. Бернулли заданных параметров, а также величин, предварительно вычисленных (например, средней скорости v). Знание скоростей v_i и диаметра d_i на всех участках трубопровода, а также коэффициента кинематической вязкости ν жидкости и абсолютной шероховатости $\Delta_{\text{э}}$ (величины ν и $\Delta_{\text{э}}$ берут из справочной литературы) позволяет предварительно установить для каждого участка трубопровода область гидравлического сопротивления и на этой основе определить коэффициенты λ и ζ .

Задача II типа. Определить расход жидкости Q и (или) среднюю скорость v в каком-либо сечении потока, если известны потребный напор $H_{нотр}$, род жидкости и ее температура, материал труб и состояние их внутренней поверхности, длины всех участков трубопровода l_i и внутренние диаметры d_i труб.

Решение. Величину Q и (или) v определяют из уравнения Д. Бернулли путем последовательных приближений.

Не имея возможности в силу незнания Q (или v) заранее установить для каждого участка трубопровода режим течения и область

гидравлического сопротивления, предполагают, что все участки трубопровода работают в области квадратичного сопротивления, где коэффициенты λ и ζ не зависят от числа Рейнольдса (в этом случае λ зависит только от L_3/d , а ζ – от вида местного сопротивления). Затем решают уравнение Д. Бернулли относительно искомой величины и получают ее первое приближение Q_1 (или v_1). Далее, зная Q_1 (или v_1), определяют, в какой области гидравлического сопротивления в действительности будет работать каждый участок рассчитываемого трубопровода. Если выяснится, что все участки работают в области квадратичного сопротивления, найденную величину Q_1 (или v_1) считают окончательной, т. е. принимают за расчетную. Если какие-либо участки трубопровода (или какой-нибудь один участок) работают(ет) в других областях гидравлического сопротивления (доквадратичной или гладких труб), вычисляют для этих участков по соответствующим эмпирическим формулам более точные значения коэффициента λ и, подставив их в уравнение Д. Бернулли, находят величину расхода (или средней скорости) во втором приближении Q_2 (или v_2). Эти величины считают окончательными.

Задача III типа. Определить внутренний диаметр d одного из участков трубопровода, если известны расход потока жидкости $Q_{необх.}$, род жидкости и ее температура, потребный напор $H_{номр.}$, материал труб и состояние их внутренней поверхности, внутренние диаметры d_i остальных участков.

Решение. Задачи этого типа можно решить только подбором. Для уменьшения числа попыток задачи решают обычно графоаналитическим методом с построением графика $Q = f(d)$ и находят по нему величину d .

Пример оформления графика $Q = f(d)$ см. на рис. 4.14 и 5.8. При расчете коротких трубопроводов (независимо от типа решаемых задач) рекомендуется излагать решение в такой последовательности:

выбирают и обозначают на расчетной схеме трубопровода (рис. 5.2.1) два живых сечения потока (I-I и II-II), в каждом из которых должно быть известно не менее двух слагаемых трехчлена $(z + p / \rho g + \alpha v^2 / 2g)$, и плоскость сравнения 0-0. Целесообразно совмещать плоскость сравнения с центром тяжести одного из выбранных живых сечений (в этом случае величина z_1 или z_2 становятся равными нулю);

записывают уравнение Д. Бернулли в общем виде;

конкретизируют слагаемые уравнения Д. Бернулли полученного уравнения применительно к условиям решаемой задачи и принятым обозначениям величин;

записывают уравнение Д. Бернулли для выбранных живых сечений потока применительно к условиям решаемой задачи с учетом высотного расположения выбранной плоскости сравнения;

решают уравнение Д. Бернулли относительно искомой величины, делая необходимые алгебраические преобразования и табулируя расчеты, требующиеся для построения графика $Q = f(d)$.

вычислив скоростные напоры, а также потери напора по длине на каждом участке трубопровода и потери напора в каждом местном сопротивлении, строят в масштабе график напоров (диаграмму уравнения Д. Бернулли). Примеры оформления графика напоров даны на рис. 5.2.2, 5.2.4, 5.2.6, 5.2.9 и 5.2.11.

5.2. Примеры решения задач

Задача 5.2.1. Трубопровод, соединяющий открытые резервуары *A* и *B* (рис. 5.2.1), должен обеспечивать пропуск расхода воды $Q = 0,017 \text{ м}^3/\text{с}$ при температуре $t = 20 \text{ °С}$. Трубы стальные, заржавленные умеренно. Длины участков трубопровода $l_1 = 80 \text{ м}$, $l_2 = 40 \text{ м}$, внутренние диаметры труб $d_1 = 0,125 \text{ м}$, $d_2 = 0,080 \text{ м}$ соответственно. Угол открытия пробкового (конического) крана, расположенного в середине второго участка, $\alpha = 25^\circ$.

Определить перепад уровней воды H в резервуарах и построить диаграмму уравнения Д. Бернулли (график напоров).

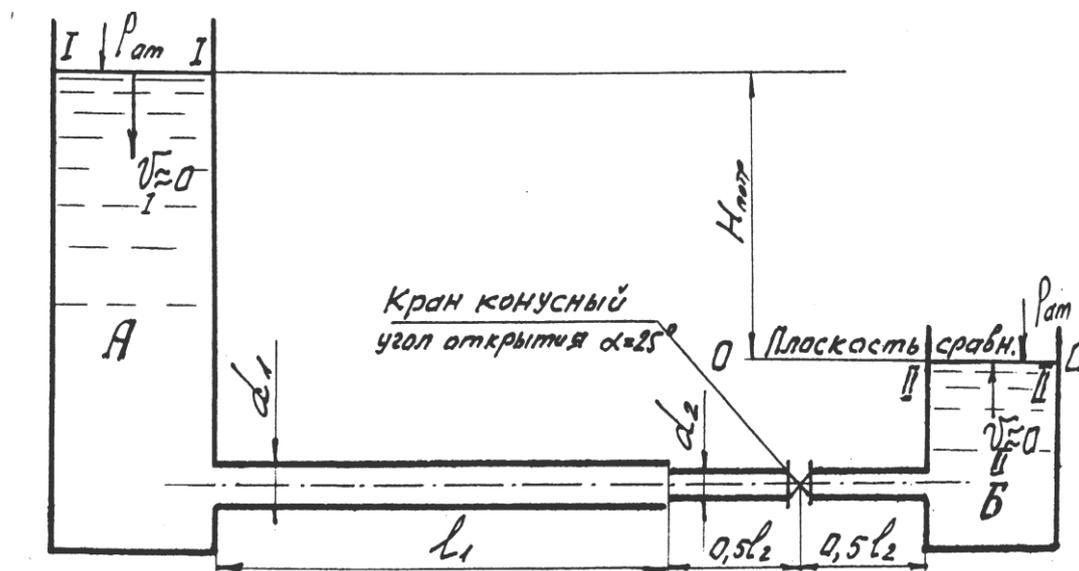


Рис. 5.2.1. Схема к гидравлическому расчету короткого трубопровода

Решение. Данная задача относится к I типу. Искомый перепад уровней воды H , когда резервуары открыты, является потребным напором $H_{потр}$. Для определения величины $H = H_{потр}$ свяжем уравнением Д. Бернулли два живых сечения потока (I-I и II-II) и решим его относительно искомой величины $H_{потр}$. В живых сечениях потока, связываемых уравнением Д. Бернулли, должно быть известно, согласно этим рекомендациям, наибольшее число слагаемых трехчлена ($z + p / \rho g +$

+ $\alpha v^2 / 2g$), по сравнению с другими сечениями, а плоскость сравнения целесообразно совмещать с центром тяжести любого из выбранных сечений.

Применительно к условиям задачи для нахождения $H_{нотр}$ необходимо связать уравнением Д. Бернулли сечения, совпадающие с уровнями воды в резервуарах A и B , а плоскость сравнения провести через центр тяжести сечения II-II (см. рис. 5.2.1). В сечениях, совпадающих с уровнями воды в резервуарах, известны давление (равно атмосферному $p_{ат}$) и средние скорости (их можно приближенно считать равными нулю ($v_1 \approx 0$ и $v_2 \approx 0$), поскольку площади поперечного сечения резервуаров во много раз больше площадей поперечного сечения трубопровода). Кроме того, для сечения II-II $z_2 = 0$.

По условиям данной задачи слагаемые уравнения Д. Бернулли будут иметь вид:

$$\begin{aligned} z_1 &= H_{нотр}; & p_1 / \rho g &= p_{ат} / \rho g; & \alpha_1 v_1^2 / 2g &\approx 0; \\ z_2 &= 0; & p_2 / \rho g &= p_{ат} / \rho g; & \alpha_2 v_2^2 / 2g &\approx 0; \\ h_{w1-2} &= \Sigma h_l + \Sigma h_m = h_{l1} + h_{l2} + h_{вх} + h_{p.c} + h_{кр} + h_{вых}, \end{aligned}$$

где h_{l1} , h_{l2} – потери напора по длине на первом и втором участках соответственно; $h_{вх}$, $h_{p.c}$, $h_{кр}$, $h_{вых}$ – потери напора в местных сопротивлениях при входе потока в трубопровод из резервуара, при резком сужении трубопровода, в кране, при выходе потока из трубопровода в резервуар (при истечении под уровень) соответственно.

Записываем уравнение Д. Бернулли для условий задачи, выразив при этом потери h_l и h_m по формулам (4.11) и (4.12). Решив выведенное уравнение относительно искомой величины $H_{нотр}$, получим:

$$H_{нотр} = \lambda_1 \frac{l_1 v_1^2}{d_1 2g} + \lambda_2 \frac{l_2 v_2^2}{d_2 2g} + \zeta_{вх} \frac{v_1^2}{2g} + \zeta_{p.c} \frac{v_2^2}{2g} + \zeta_{кр} \frac{v_2^2}{2g} + \zeta_{вых} \frac{v_2^2}{2g}. \quad (5.1)$$

Далее вычислим величину $H_{нотр}$ прямой подстановкой входящих в выражение (5.1) величин, предварительно найдя:

а) средние скорости v_1 и v_2 на участках из уравнения (4.6):

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{Q}{\omega_1} = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot d_1^2} = \frac{0,017 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,125^2} = 1,38 \text{ м/с}; \\ v_2 &= \frac{Q}{\omega_2} = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot d_2^2} = \frac{0,017 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,08^2} = 3,38 \text{ м/с}; \end{aligned}$$

б) коэффициенты гидравлического трения λ_1 и λ_2 по эмпирическим формулам с учетом области гидравлического сопротивления, определяемой по числу Рейнольдса Re и относительной шероховатости Δ_3 / d (с использованием граничных чисел Рейнольдса (см. прилож. 5);

в) величины коэффициентов $\zeta_{вх}$, $\zeta_{p.c}$, $\zeta_{кр}$, $\zeta_{вых}$ находим в прилож. 6: $\zeta_{вх} = 0,5$ – для острых входных кромок; $\zeta_{p.c}$ вычислим по эмпирической формуле Идельчика (см. прилож. 6): $\zeta_{p.c} = 0,5(1 - d_2^2 / d_1^2) = 0,5(1 - 1,125^2 / 0,08^2) = 0,30$; $\zeta_{кр} = 3,45$; $\zeta_{вых} = 1,0$.

С целью установления областей гидравлического сопротивления вычислим для каждого участка величину Re по формуле (4.9) и относительную шероховатость $\Delta_{\text{э}} / d$, найдя в прилож. 1 и 4 коэффициент кинематической вязкости ν воды при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\nu = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) и абсолютную эквивалентную шероховатость ($\Delta_{\text{э}} = 0,5 \text{ мм}$).

Для первого участка трубопровода

$$Re_1 = \frac{v_1 d_1}{\nu} = \frac{1,38 \cdot 0,125}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 170792; \quad \frac{\Delta_{\text{э}}}{d_1} = \frac{0,5}{125} = 0,004.$$

для второго –

$$Re_2 = \frac{v_2 d_2}{\nu} = \frac{3,38 \cdot 0,08}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 267723; \quad \frac{\Delta_{\text{э}}}{d_2} = \frac{0,5}{80} = 0,00625.$$

Поскольку Re_1 и Re_2 больше критического числа Рейнольдса ($Re_{кр} = 2320$), режим движения воды в трубопроводе турбулентный. Далее найдем величины граничного числа Рейнольдса $Re_{кв} = 500d / \Delta_{\text{э}}$ для каждого участка трубопровода, отвечающие началу их работы в области квадратичного сопротивления:

$$\text{для первого участка } Re_{кв1} = 500d_1 / \Delta_{\text{э}} = 500 \cdot 125 / 0,5 = 125000;$$

$$\text{для второго – } Re_{кв2} = 500d_2 / \Delta_{\text{э}} = 500 \cdot 80 / 0,5 = 80000.$$

Исходя из того, что $Re_1 = 170792 > Re_{кв1} = 125000$ и $Re_2 = 267723 > Re_{кв2} = 80000$, приходим к выводу, что оба участка будут работать в области квадратичного сопротивления, поэтому коэффициенты λ_1 и λ_2 вычислим по формуле (4.16):

$$\lambda_1 = 0,11(\Delta_{\text{э}} / d_1)^{0,25} = 0,11 \cdot 0,004^{0,25} = 0,028;$$

$$\lambda_2 = 0,11(\Delta_{\text{э}} / d_2)^{0,25} = 0,11 \cdot 0,00625^{0,25} = 0,031.$$

Подставив заданные и найденные величины в выражение (5.1), вычислим величину потребного напора:

$$\begin{aligned} H_{\text{потр}} &= 0,28 \frac{80 \cdot 1,38^2}{0,125 \cdot 2 \cdot 9,81} + 0,031 \frac{40 \cdot 3,38^2}{0,08 \cdot 2 \cdot 9,81} + 0,5 \frac{1,38^2}{2 \cdot 9,81} + 0,3 \frac{1,38^2}{2 \cdot 9,81} + \\ &+ 3,45 \frac{3,38^2}{2 \cdot 9,81} + 1,0 \frac{3,38^2}{2 \cdot 9,81} = 1,74 + 9,02 + 0,05 + 0,17 + 2,01 + 0,58 = 13,57 \text{ м.} \end{aligned}$$

Построение графика напоров. График напоров, включающий в себя линию полного напора и пьезометрическую, показывает изменение по длине трубопровода полного напора потока и его составляющих.

Для построения графика вычерчиваем в искаженном масштабе трубопровод (рис. 5.2.2) и показываем на нем выбранные живые сечения потока I-I и II-II, совпадающие с уровнями воды в резервуарах *A* и *B*, а также плоскость сравнения 0-0. Поскольку резервуары открытые, уровни воды в них являются одновременно пьезометрическими уровнями.

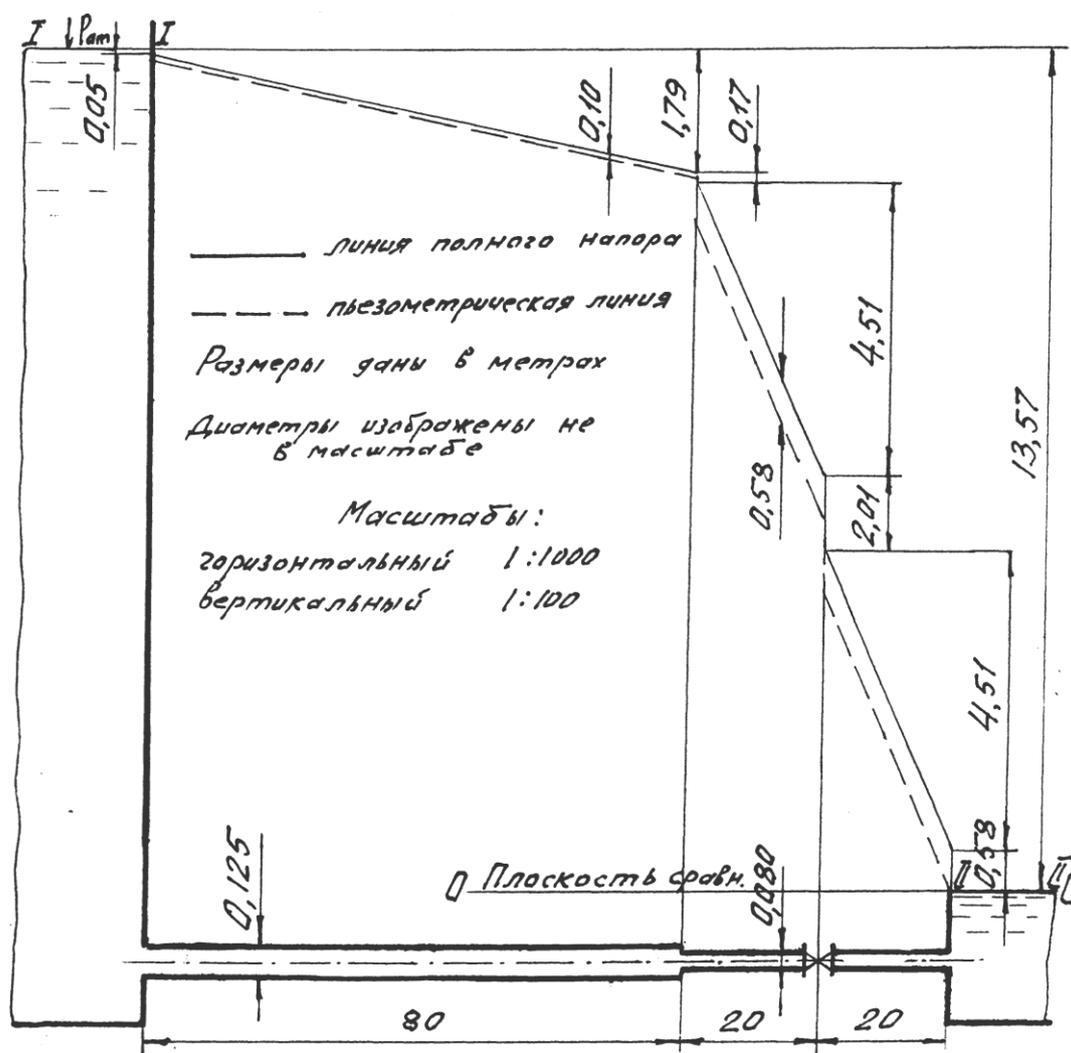


Рис. 5.2.2. График напоров (диаграмма уравнения Бернулли)

Линию полного напора (полной удельной механической энергии потока) строим, последовательно вычитая потери напора, нарастающие вдоль потока, из начального напора потока (заданного в нашем случае пьезометрическим уровнем в питающем резервуаре A), равного 13,57 м.

Пьезометрическую линию, показывающую изменение гидростатического напора потока, строим, вычитая из полного напора в рассматриваемых сечениях потока скоростные напоры.

Для упрощения построения графика напоров условно считаем, что местная потеря напора h_m в любом местном сопротивлении сосредоточена в живом сечении потока, в котором расположено местное сопротивление.

Для построения линии полного напора вычитаем из начального напора $H_{нотр} = 13,57$ м потерю напора при входе потока в трубопровод $h_{вх} = 0,05$ м и получаем полный напор в начале первого участка трубопровода: $13,57 - 0,05 = 13,52$ м. Чтобы найти полный напор в конце первого участка трубопровода, вычитаем из первоначального напора $H_{нотр} = 13,57$ м сумму

двух потерь напора (при входе $h_{ex} = 0,05$ м и по длине первого участка $h_{l1} = 1,74$), т. е. $13,57 - (0,05 + 1,74) = 11,78$ м.

Для нахождения полного напора в начале второго участка вычитаем из $H_{номр}$ сумму трех потерь напора ($h_{ex} + h_{l1} + h_{p.c}$) и получаем $13,57 - (0,05 + 1,74 + 0,17) = 11,61$ м.

Аналогично найдем следующие величины полного напора: перед краном:

$$13,57 - (0,05 + 1,74 + 0,17 + 9,02 \cdot 0,5) = 7,10 \text{ м};$$

непосредственно за краном:

$$13,57 - (0,05 + 1,74 + 0,17 + 9,02 \cdot 0,5 + 2,01) = 5,09 \text{ м};$$

в конце второго участка, т. е. перед выходом из трубопровода в резервуар *Б*:

$$13,57 - (0,05 + 1,74 + 0,17 + 9,02 + 2,01) = 0,58 \text{ м};$$

непосредственно за выходом, т. е. в резервуаре *Б*:

$$13,57 - (0,05 + 1,74 + 0,17 + 9,02 + 2,01 - 0,58) = 0,00 \text{ м}.$$

Как видим, в открытых резервуарах потребный напор $H_{номр}$ целиком затрачивается на преодоление потерь напора в трубопроводе:

$$H_{номр} = \Sigma h_{w1-2} = \Sigma h_l + \Sigma h_m.$$

Откладываем в масштабе полученные полные напоры в рассмотренных живых сечениях потока и, учитывая, что движение воды на участках равномерное, соединяем прямыми линиями концы отрезков, выражающих полные напоры в начале и в конце каждого участка. Получаем линию полного напора (см. рис. 5.2.2).

Для построения пьезометрической линии откладываем от построенной линии полного напора вертикально вниз величины скоростных напоров $v_1^2 / 2g = 0,1$ м на первом участке и $v_2^2 / 2g = 0,58$ м на втором и, проведя через концы отрезков, выражающих скоростные напоры, линии, параллельные линии полного напора, получим пьезометрическую линию (см. пунктирную линию на рис. 5.2.2).

Задача 5.2.2. Вода сливается из бака *А* в атмосферу по трубопроводу, состоящему из двух участков. Трубы стальные, новые. Диаметр труб на первом участке $d_1 = 0,08$ м, на втором – $d_2 = 0,05$ м. Длина первого участка $l_1 = 10$ м, второго – $l_2 = 5$ м (рис. 5.2.3). Посередине второго участка имеется вентиль, открытый полностью. Превышение уровня воды в резервуаре *А* над центром тяжести выходного сечения трубопровода $H = 9,5$ м. Температура воды $t = 15$ °С.

Определить, какой расход воды Q пропустит трубопровод. Построить график напоров.

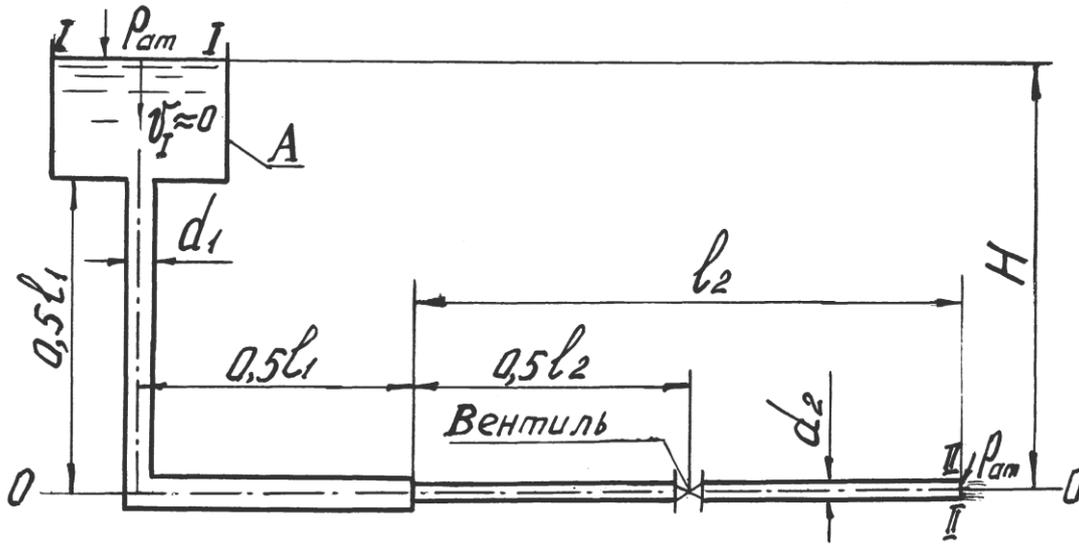


Рис. 5.2.3. Схема к гидравлическому расчету короткого трубопровода

Решение. Задача относится к II типу, поэтому расход воды Q может быть найден только путем последовательных приближений. Определяя величину расхода Q в первом приближении, будем полагать, что трубопровод работает в области квадратичного сопротивления (в этом случае коэффициенты λ и ζ не зависят от числа Рейнольдса Re).

Для нахождения величины Q применим уравнение Д. Бернулли к живым сечениям потока I-I и II-II (см. рис. 5.2.3), приняв за плоскость сравнения 0-0 плоскость, проходящую через центр тяжести сечения II-II, т. е. через центр тяжести выходного сечения трубопровода. Сечение I-I совмещаем со свободной поверхностью воды в баке A. Выбор именно этих сечений обусловлен тем, что в них известно наибольшее число слагаемых трехчлена ($z+p/\rho g + \alpha v^2/2g$), по сравнению с остальными живыми сечениями потока. Действительно, в сечении I-I известны все три слагаемые трехчлена ($z_1 = H$; $p_1/\rho g = p_{atm}/\rho g$; $\alpha_1 v_1^2/2g \approx 0$, так как площадь бака A во много раз превышает площадь поперечного сечения трубопровода). В сечении II-II известны два слагаемых:

$$z_2 = 0; p_2/\rho g = p_{atm}/\rho g.$$

Применительно к условиям данной задачи уравнение Д. Бернулли примет вид

$$H = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2}, \quad (5.2)$$

где α – коэффициент Кориолиса в сечении II-II (примем $\alpha_2 \approx 1,0$); v_2 – средняя скорость движения потока в сечении II-II; $h_{w1-2} = \Sigma h_l + \Sigma h_m$ – суммарные потери полного напора в трубопроводе.

Для условий данной задачи

$$h_{W1-2} = h_{l1} + h_{l2} + h_{ex} + h_{p.кол} + h_{p.c} + h_{\epsilon},$$

где h_{l1} и h_{l2} – потери напора по длине на первом и втором участках трубопровода соответственно; h_{ex} – потеря напора на вход; $h_{p.кол}$ – потеря напора в колене без закругления с поворотом на 90^0 ; $h_{p.c}$ – потеря напора при резком сужении трубопровода; h_{ϵ} – потеря напора в полностью открытом вентиле.

Выразив входящие в уравнение (5.2) потери напора согласно формулам (4.11) и (4.12), а средние скорости – в соответствии с уравнением (4.6), получим:

$$H = \frac{Q^2}{2g\omega_2^2} + \lambda_1 \frac{l_1 Q^2}{d_1 2g\omega_1^2} + \lambda_2 \frac{l_2 Q^2}{d_2 2g\omega_2^2} + \zeta_{ex} \frac{Q^2}{2g\omega_1^2} + \zeta_{p.кол} \frac{Q^2}{2g\omega_1^2} + \zeta_{p.c} \frac{Q^2}{2g\omega_2^2} + \zeta_{\epsilon} \frac{Q^2}{2g\omega_2^2}.$$

Решив это выражение относительно расхода Q , получим зависимость

$$Q = \sqrt{2gH} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\omega_2^2} + \lambda_1 \frac{l_1}{d_1 \omega_1^2} + \lambda_2 \frac{l_2}{d_2 \omega_2^2} + \frac{\zeta_{ex}}{\omega_1^2} + \frac{\zeta_{p.кол}}{\omega_1^2} + \frac{\zeta_{p.c}}{\omega_2^2} + \frac{\zeta_{\epsilon}}{\omega_2^2}}}. \quad (5.3)$$

Полагая работу трубопровода в области квадратичного сопротивления, вычислим коэффициенты гидравлического трения λ_1 и λ_2 по формуле (4.16). Затем, приняв абсолютную шероховатость труб по прилож. 4 ($\Delta_{\epsilon} = 0,10$ мм), получим:

$$\lambda_1 = 0,11(\Delta_{\epsilon} / d_1)^{0,25} = 0,11 \cdot (0,10 / 80)^{0,25} = 0,021;$$

$$\lambda_2 = 0,11(\Delta_{\epsilon} / d_2)^{0,25} = 0,11 \cdot (0,10 / 50)^{0,25} = 0,023.$$

Коэффициенты местного сопротивления найдем в прилож. 6 ($\zeta_{ex} = 0,5$; $\zeta_{p.кол} = 1,26$; $\zeta_{p.c} = 0,30$; $\zeta_{\epsilon} = 4,6$) и определим площади ω_1 и ω_2 поперечного сечения трубопровода на первом и втором участках:

$$\omega_1 = (3,14 \cdot 0,08^2) / 4 = 0,00502 \text{ м}^2; \quad \omega_2 = (3,14 \cdot 0,05^2) / 4 = 0,00196 \text{ м}^2.$$

Подставив заданные и найденные величины в зависимость (5.3), получим величину расхода воды в первом приближении:

$$Q_1 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 9,85} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{0,00196^2} + \frac{0,021 \cdot 10}{0,08 \cdot 0,00502^2} + \frac{0,023 \cdot 5}{0,05 \cdot 0,00196^2} + \frac{0,5}{0,00502^2} + \frac{1,26}{0,00502^2} + \frac{0,30}{0,00196^2} + \frac{4,6}{0,00196^2}}} = 13,65 \frac{1}{\sqrt{259645 + 104165 + 597183 + 19841 + 49499 + 77893 + 1194367}} = 0,009 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Выясним, в какой области гидравлического сопротивления в действительности будет работать каждый участок трубопровода. С этой целью по формуле (4.9) вычислим для участков трубопровода числа Рейнольдса Re_1 и Re_2 и сравним их с величинами $Re_{кв1}$ и $Re_{кв2}$ граничного числа Рейнольдса, вычисляемого по формуле $Re_{кв} = 500d / \Delta_{\epsilon}$, т. е. с величинами Re , отвечающими началу работы участков трубопровода в области квадратичного сопротивления.

Если Re_1 и Re_2 окажутся больше $Re_{кв1}$ и $Re_{кв2}$, значит, оба участка будут действительно работать в области квадратичного сопротивления.

Вычисляем числа Рейнольдса, предварительно найдя в прилож. 1 величину коэффициента кинематической вязкости ν воды при 15 °C ($\nu = 1,12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$):

$$Re_1 = \frac{0,009 \cdot 0,08}{0,00502 \cdot 1,12 \cdot 10^{-6}} = \frac{1,79 \cdot 0,08 \cdot 10^6}{1,12} = 127587;$$

$$Re_2 = \frac{0,009 \cdot 0,05}{0,00196 \cdot 1,12 \cdot 10^{-6}} = \frac{4,59 \cdot 0,05 \cdot 10^6}{1,12} = 20491.$$

Определяем граничные числа Рейнольдса $Re_{кв1}$ и $Re_{кв2}$:

$$Re_{кв1} = (500 \cdot 80) / 0,10 = 400000;$$

$$Re_{кв2} = (500 \cdot 50) / 0,10 = 250000.$$

Поскольку $Re_1 < Re_{кв1}$ и $Re_2 < Re_{кв2}$, оба участка не будут работать в области квадратичного сопротивления.

Для установления области сопротивления вычислим граничное число Рейнольдса $Re_{эл} = 10 / \Delta_э$, отвечающее началу работы трубопровода в области гидравлически гладких труб:

$$Re_{эл1} = (10 \cdot 80) / 0,10 = 8000;$$

$$Re_{эл2} = (10 \cdot 50) / 0,10 = 5000.$$

Поскольку $Re_1 > Re_{эл1}$ и $Re_2 > Re_{эл2}$, оба участка будут работать в области докватричного сопротивления. Далее вычислим расход воды во втором приближении Q_2 , найдя предварительно коэффициенты гидравлического трения λ_1 и λ_2 по формуле А.Д. Альтшуля (см. уравнение (4.15)) для области докватричного сопротивления:

$$\lambda_1 = 0,11 \cdot (0,10 / 80 + 68 / 127\,857)^{0,25} = 0,023;$$

$$\lambda_2 = 0,11 \cdot (0,10 / 50 + 68 / 204\,911)^{0,25} = 0,024;$$

$$Q_2 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 9,85 \times$$

$$\times \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{0,00196^2} + \frac{0,023 \cdot 10}{0,08 \cdot 0,00502^2} + \frac{0,024 \cdot 5}{0,05 \cdot 0,00196^2} + \frac{0,5}{0,00502^2} + \frac{1,26}{0,00502^2} + \frac{0,30}{0,00196^2} + \frac{4,6}{0,00196^2}}} =$$

$$= 13,65 \frac{1}{\sqrt{259645 + 114085 + 623148 + 19841 + 49499 + 77893 + 1194367}} = 0,0089 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Величину Q_2 считаем искомой величиной расхода; $Q_2 = Q = 0,0089 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для построения графика напоров предварительно подсчитаем потери напора по длине и скоростные напоры на участках, а также потери напора в каждом местном сопротивлении:

$$h_{11} = 0,23 \frac{10 \cdot 0,0089^2}{0,08 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 0,00502^2} = 0,023 \frac{10}{0,08} 0,16 = 0,46 \text{ м};$$

$$h_{12} = 0,023 \frac{5 \cdot 0,0089^2}{0,05 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 0,00196^2} = \frac{2,4}{19,62} 20,62 = 2,53 \text{ м};$$

$$\frac{v_1^2}{2g} = 0,16 \text{ м}; \quad \frac{v_2^2}{2g} = 1,05 \text{ м};$$

$$h_{\text{ex}} = 0,5 \cdot 0,16 = 0,08 \text{ м}; \quad h_{\text{р.кол}} = 1,26 \cdot 0,16 = 0,20 \text{ м};$$

$$h_{\text{р.с.}} = 0,3 \cdot 1,05 = 0,32 \text{ м}; \quad h_{\text{вых}} = 4,6 \cdot 1,05 = 4,86 \text{ м}.$$

Линию полного напора (полной удельной энергии потока) найдем, последовательно вычитая потери напора, нарастающие вдоль потока, из начального напора, заданного пьезометрическим уровнем в баке *A* (в данном случае этот уровень совпадает со свободной поверхностью воды в баке). Пьезометрическую линию получим вычитанием скоростного напора из полного напора в рассматриваемых живых сечениях потока.

Приняв масштабы (горизонтальный – 1:50 и вертикальный – 1:25), строим график напоров (рис. 5.2.4).

Задача 5.2.3. Определить, какое манометрическое давление p_l необходимо создать в левом резервуаре (рис. 5.2.5), чтобы подать в правый резервуар, находящийся под манометрическим давлением $p_n = 20$ кПа, расход $Q = 0,020$ м³/с при $t = 10$ °С по трубопроводу, состоящему из двух участков ($l_1 = 30$ м, $l_2 = 20$ м) при диаметрах труб $d_1 = 0,10$ м и $d_2 = 0,15$ м. В середине второго участка установлена простая задвижка, степень открытия которой $a/d = 0,5$. Трубы стальные, нормальные. Глубина воды в левом резервуаре $h_l = 2,5$ м, в правом – $h_n = 1,5$ м.

Построить график напоров.

Решение. Манометрическое давление p_l на свободной поверхности воды в левом резервуаре определим прямой подстановкой величин в уравнение Д. Бернулли.

С учетом рекомендаций, изложенных в подпункте 4.1, выбираем живые сечения потока I-I и II-II, для которых запишем уравнение (4.4), и плоскость сравнения 0-0. Для условий данной задачи сечение I-I совместим с уровнем воды в левом резервуаре, а сечение II-II – в правом, так как именно в этих живых сечениях потока известно наибольшее число слагаемых трехчлена ($z + p / \rho g + \alpha v^2 / 2g$). Плоскость сравнения совместим с осью трубопровода. Применительно к условиям задачи уравнение Д. Бернулли примет вид

$$h_l + p_l / \rho g = h_n + p_n / \rho g + h_{w1-2}. \quad (5.4)$$

Решая его относительно искомой величины, получим:

$$p_l = (h_n - h_l + p_n / \rho g + h_{w1-2}) \cdot \rho g = (1,5 - 2,5 + 20000 / 1000 \cdot 9,81 + h_{w1-2}) \cdot 1000 \cdot 9,81 = (1,04 + h_{w1-2}) = 9810 \text{ Па}.$$

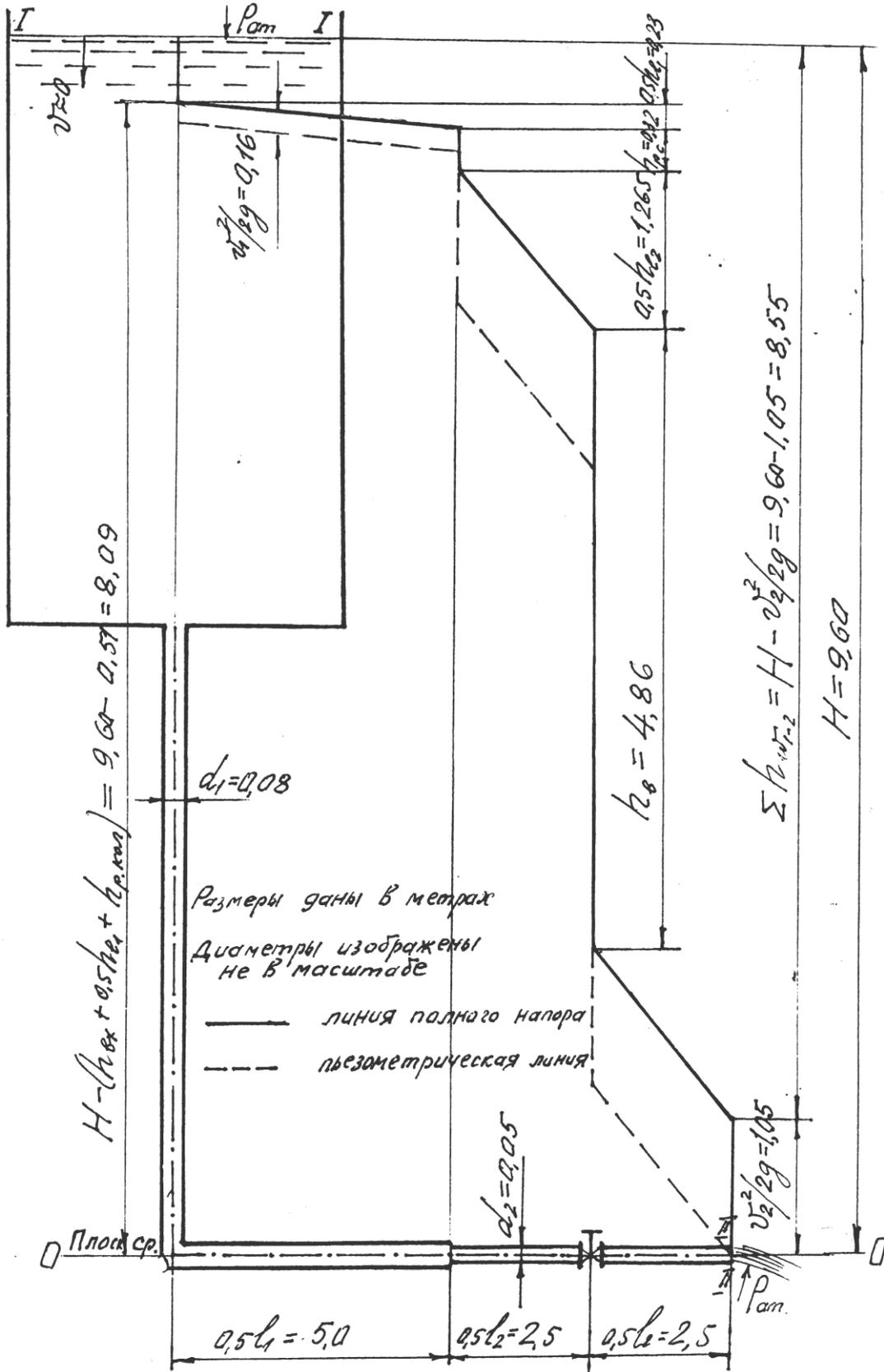


Рис. 5.2.4. График напоров (к задаче 5.2.2)

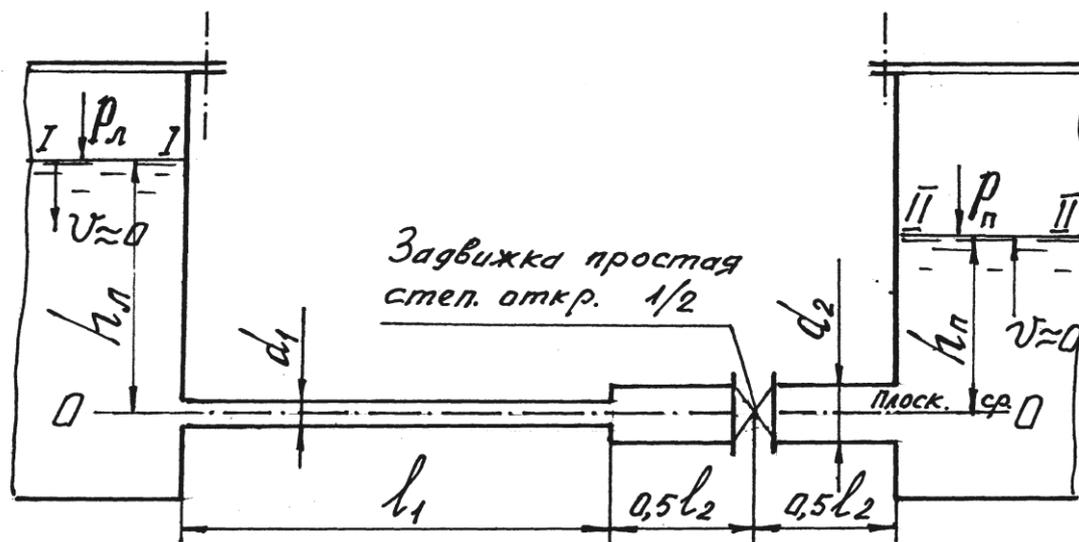


Рис. 5.2.5. Схема к гидравлическому расчету короткого трубопровода (к задаче 5.2.3)

Как видим, задача по определению величины p_l сводится к вычислению потерь напора h_{W1-2} , т. е. потерь напора по длине и местных. Для нашего случая

$$h_{W1-2} = h_{l1} + h_{l2} + h_{ex} + h_{p,p} + h_3 + h_{вых},$$

где h_{l1} и h_{l2} – потери напора по длине на первом и втором участках трубопровода; h_{ex} – потеря напора на вход; $h_{p,p}$ – потеря напора при резком расширении трубопровода; h_3 – потеря напора в задвижке; $h_{вых}$ – потеря напора при выходе потока из трубопровода в резервуар (истечение под уровень).

Выражая потери напора по длине и местные – по формулам (4.11) и (4.12), а средние скорости – через расход Q по формуле (4.6), получим выражение для вычисления давления p_l :

$$p_l = \left(1,04 + \lambda_1 \frac{l_1 Q^2}{d_1^2 2g\omega_1^2} + \lambda_2 \frac{l_2 Q^2}{d_2^2 2g\omega_2^2} + \zeta_{ex} \frac{Q^2}{2g\omega_1^2} + \right. \\ \left. + \zeta_{p,p} \frac{Q^2}{2g\omega_1^2} + \zeta_3 \frac{Q^2}{2g\omega_2^2} + \zeta_{вых} \frac{Q^2}{2g\omega_2^2} \right) \cdot 9810. \quad (5.5)$$

В правой части выражения (5.5) неизвестны только коэффициенты гидравлического трения λ_1 и λ_2 и коэффициенты местных сопротивлений ζ_{ex} , $\zeta_{p,p}$, ζ_3 , $\zeta_{вых}$.

Коэффициенты λ_1 и λ_2 вычислим по эмпирическим формулам, установив предварительно, в какой области гидравлического сопротивления будет работать каждый участок трубопровода. Величины коэффициентов местных сопротивлений найдем в прилож. 6.

Для установления области гидравлического сопротивления определим по формуле (4.9) для каждого участка число Рейнольдса Re . Если оно

окажется больше критического ($Re_{кр} = 2320$), найдем относительную шероховатость $\Delta_{\text{э}}/d$ (величину абсолютной эквивалентной шероховатости $\Delta_{\text{э}}$ возьмем из прилож. 4, а именно, $\Delta_{\text{э}} = 0,19$ мм). Далее, имея для каждого участка Re и $\Delta_{\text{э}}/d$, по графику Г.А. Мурина (см. прилож. 5) установим область гидравлического сопротивления и выберем соответствующие формулы для вычисления коэффициентов λ_1 и λ_2 :

$$Re_1 = \frac{v_1 d_1}{\nu} = \frac{Q d_1}{\nu \frac{\pi}{4} d_1^2} = \frac{0,02}{1,31 \cdot 10^{-6} \cdot 0,785 \cdot 0,10} = 194486;$$

$$Re_2 = \frac{v_2 d_2}{\nu} = \frac{Q d_2}{\nu \frac{\pi}{4} d_2^2} = \frac{0,02}{1,31 \cdot 10^{-6} \cdot 0,785 \cdot 0,15} = 129658;$$

$$\frac{\Delta_{\text{э}}}{d_1} = \frac{0,19}{100} = 0,0019; \quad \frac{\Delta_{\text{э}}}{d_2} = \frac{0,19}{150} = 0,00127.$$

Обратившись к графику Г.А. Мурина, приходим к выводу, что оба участка будут работать в области доквадратичного сопротивления, поэтому коэффициенты λ_1 и λ_2 установим по формуле (4.15):

$$\lambda_1 = 0,11 \left(\frac{\Delta_{\text{э}}}{d_1} + \frac{68}{Re_1} \right)^{0,25} = 0,11 \left(0,0019 + \frac{68}{124486} \right)^{0,25} = 0,024;$$

$$\lambda_2 = 0,11 \left(\frac{\Delta_{\text{э}}}{d_2} + \frac{68}{Re_2} \right)^{0,25} = 0,11 \left(0,00127 + \frac{68}{129658} \right)^{0,25} = 0,0226.$$

Коэффициенты местных сопротивлений:

$$\zeta_{\text{вх}} = 0,5;$$

$$\zeta_{p.p} = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2} \right)^2 = \left(1 - \frac{0,10^2}{0,15^2} \right)^2 = 0,31;$$

$$\zeta_3 = 2,6;$$

$$\zeta_{\text{вых}} = 1,0.$$

Подставив в выражение (5.5) заданные величины, а также найденные значения коэффициентов гидравлического трения и местных сопротивлений, вычислим величину p_L :

$$\begin{aligned} p_L &= \left(1,04 + 0,024 \frac{30 \cdot 0,02^2 \cdot 10^5}{0,10 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 6,16} + 0,0226 \frac{2,0 \cdot 0,02^2 \cdot 10^4}{0,15 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 3,12} + 0,5 \frac{0,02^2 \cdot 10^5}{2 \cdot 9,81 \cdot 6,16} + \right. \\ &+ 0,031 \frac{0,02^2 \cdot 10^5}{2 \cdot 9,81 \cdot 6,16} + 2,6 \frac{0,02^2 \cdot 10^4}{2 \cdot 9,81 \cdot 3,12} + 1,0 \frac{0,02^2 \cdot 10^4}{2 \cdot 9,81 \cdot 3,12} \left. \right) \cdot 9810 = \\ &= (1,04 + 2,38 + 0,197 + 0,16 + 0,10 + 0,17 + 0,065) \cdot 9810 = \\ &= 4,11 \cdot 9810 = 40300 \text{ Па} = 40,30 \text{ кПа}. \end{aligned}$$

Для построения графика напоров, включающего в себя линию полного напора и пьезометрическую, вычислим величину начального напора, т. е. полного напора в сечении I-I. Этот напор равен

$$H_{I-I} = h_n + p_n / \rho g = 2,5 + 40300 / 1000 \cdot 9,81 = 2,5 + 4,11 = 6,61 \text{ м.}$$

Затем, исходя из величины начального напора и длины трубопровода, принимаем горизонтальный и вертикальный масштабы (M_c 1:500, M_g 1:50). Вычерчиваем трубопровод (диаметры труб изображаем не в масштабе) и показываем на чертеже величину начального напора H_{I-I} , определяемую положением пьезометрического уровня в левом резервуаре, после чего строим линию полного напора на основе последовательного вычитания из величины H_{I-I} потери напора, нарастающие вдоль потока.

Непосредственно за входом в трубопровод, в начале первого участка, полный напор

$$H_{\text{науч.уч.1}} = H_{I-I} - h_{\text{вх}} = 6,61 - 0,16 = 6,45 \text{ м.}$$

Непосредственно перед расширением трубопровода, в конце первого участка:

$$H_{\text{науч.уч.1}} = H_{I-I} - (h_{\text{вх}} + h_{I-I}) = 6,61 - (0,16 + 2,38) = 4,07 \text{ м.}$$

Непосредственно за расширением трубопровода, в начале второго участка:

$$H_{\text{науч.уч.2}} = H_{I-I} - (h_{\text{вх}} + h_{I-I} + h_{p,p}) = 6,61 - (0,16 + 2,38 + 0,10) = 3,97 \text{ м.}$$

Непосредственно перед задвижкой

$$\begin{aligned} H_{\text{науч.уч.2}} &= H_{I-I} - (h_{\text{вх}} + h_{I-I} + h_{p,p} + 0,5h_{12}) = \\ &= 6,61 - (0,16 + 2,38 + 0,10 + 0,10) = 3,87 \text{ м.} \end{aligned}$$

Непосредственно за задвижкой

$$H_{3,3} = 6,61 - (0,16 + 2,38 + 0,10 + 0,10 + 0,17) = 3,70 \text{ м.}$$

Перед выходом из трубопровода в резервуар, в конце второго участка:

$$H_{к.уч.2} = 6,61 - (0,16 + 2,38 + 0,10 + 0,20 + 0,17) = 3,60 \text{ м.}$$

Конечный напор, т. е. напор в сечении II-II:

$$\begin{aligned} H_{II-II} &= H_{I-I} - h_{W1-2} = 6,61 - (0,16 + 2,38 + 0,1 + 0,2 + 0,17 + 0,07) = \\ &= 6,61 - 3,07 = 3,54 \text{ м.} \end{aligned}$$

Пьезометрическую линию строим на основе вычитания скоростного напора из полного напора в указанных выше живых сечениях потока. Поскольку движение воды на участках равномерное, пьезометрическая линия на каждом участке будет параллельна линии полного напора.

Построенный график напоров представлен на рис. 5.2.6.

Задача 5.2.4. Определить величину стандартного диаметра d сифонного трубопровода (рис. 5.2.7), по которому необходимо подавать расход воды $Q = 0,050 \text{ м}^3/\text{с}$ из водоема A в водоем B при условии, что вакуумметрическая высота $h_{\text{вак}}$ в наиболее опасном сечении (см. сечение 3-3 на рис. 5.2.7) не превышала 6,5 м вод. ст. Заметим, что сечение 3-3 расположено после поворота. Превышение центра тяжести сечения 3-3 над уровнем воды в питающем водоеме $h = 3,0 \text{ м}$. Разность уровней воды в

водоемах $H = 2,0$ м. Общая длина сифонного трубопровода $l = 58$ м. Радиус закругления поворота $R_n = d$. Глубины погружения входного и выходного сечений трубопровода $h_1 = 2,0$ м; $h_2 = 1,0$ м. Трубопровод снабжен обратным клапаном с сеткой и задвижкой Лудло, степень открытия которой $a/d = 1,0$. Задвижка расположена в середине нисходящей линии сифона. Трубы чугунные, нормальные, $\Delta_3 = 1,0$ мм (см. прилож. 4). Температура воды -15 °С, $\nu = 1,15 \cdot 10^{-6}$ м²/с (см. прилож. 1).

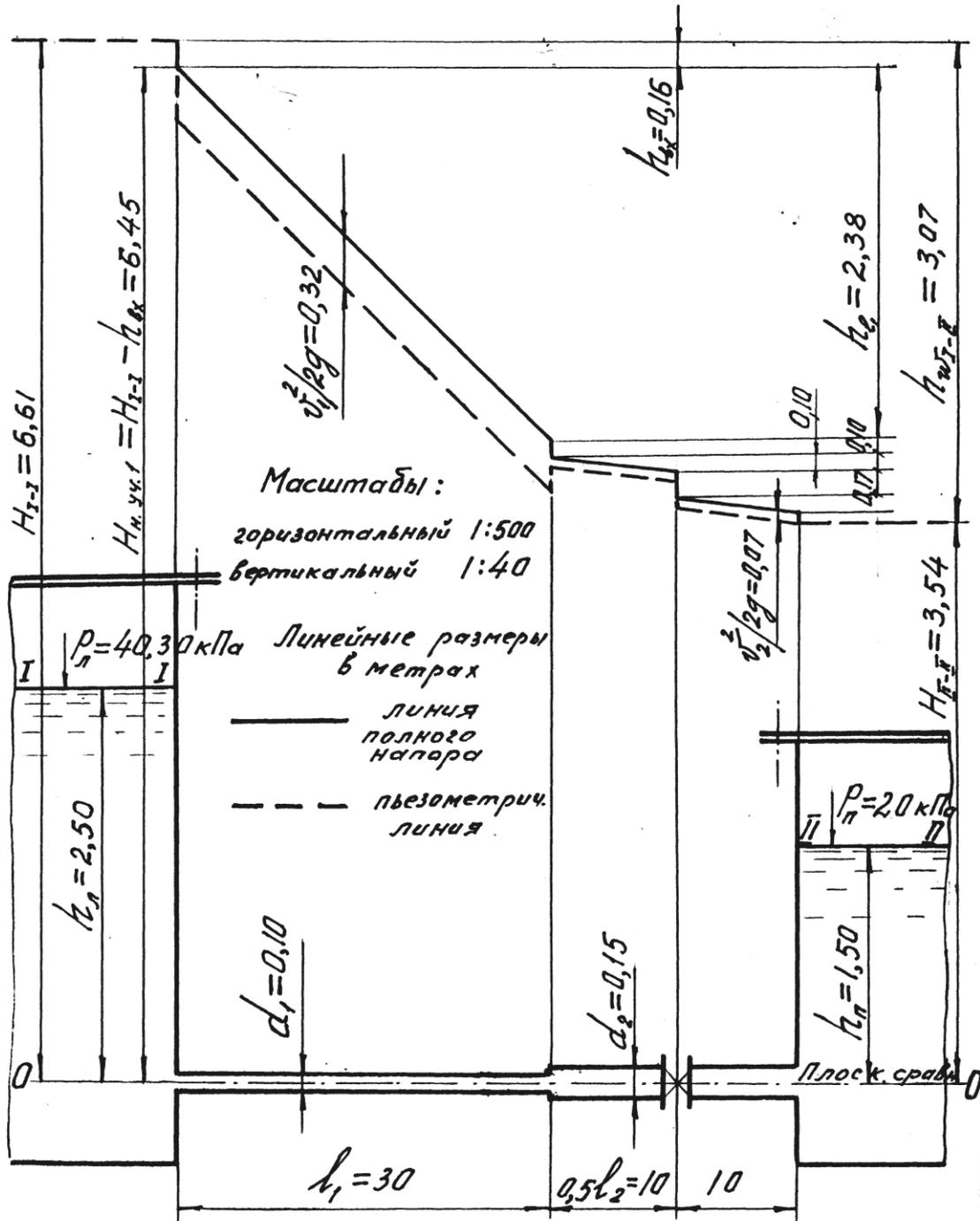


Рис. 5.2.6. График напоров (к задаче 5.2.3)

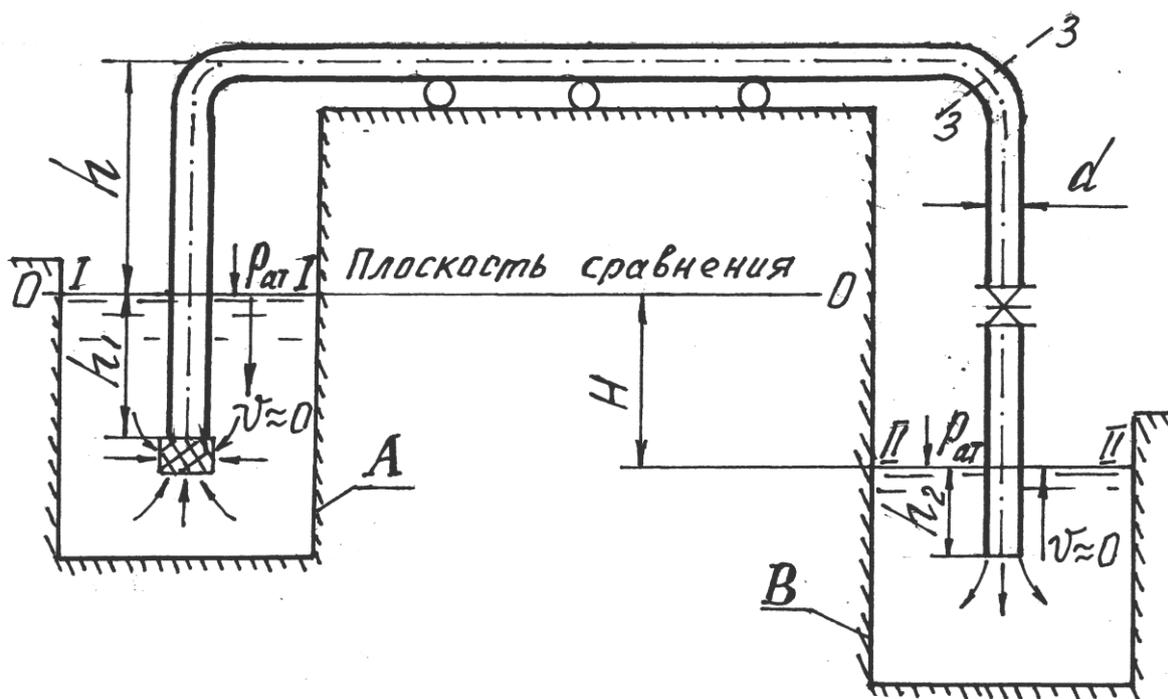


Рис. 5.2.7. Схема к гидравлическому расчету сифонного трубопровода (к задаче 5.2.4)

Решение. Для определения диаметра трубопровода с учетом поставленного условия (в сечении 3-3 $h_{\text{вак}} \leq 6,5$ м вод. ст.) применим уравнение Д. Бернулли к живым сечениям потока I-I (совпадает с уровнем воды в водоеме A) и 3-3, где ограничена величина вакуума, приняв за плоскость сравнения 0-0 плоскость, совпадающую с уровнем воды в водоеме A, т. е. с сечением I-I. Для этих условий слагаемые уравнения Д. Бернулли будут иметь вид:

$$\begin{aligned} z_1 &= 0; p_{1\text{изб}} = 0; \alpha_1 v_1^2 / 2g \approx 0; \\ p_{2\text{изб}} / \rho g &= p_{\text{вак}} / \rho g = -p_{\text{изб}} / \rho g; \\ \alpha v_2^2 / 2g &= \alpha v^2 / 2g; \\ h_{W1-2} &= h_{W1-3} = h_{l1-3} + 2h_{\text{кл.л.}} + h_{\text{кл.с}}, \end{aligned}$$

а уравнение Д. Бернулли примет вид

$$0 = h - p_{\text{изб}} / \rho g + \alpha v^2 / 2g + h_{l1-3} + 2h_{\text{кл.л.}} + h_{\text{кл.с}}. \quad (5.6)$$

Приняв $\alpha = 1,0$, подставив числовые значения величин и выразив потери по длине и местные по формулам (4.11) и (4.12) и учитывая формулу (4.6), получим:

$$6,5 - 3,0 = \frac{Q^2}{2g\omega^2} + \lambda \frac{53Q^2}{d2g\omega^2} + 2\zeta_{\text{пл.л.}} \frac{Q^2}{2g\omega^2} + 2\zeta_{\text{кл.с.}} \frac{Q^2}{2g\omega^2}. \quad (5.7)$$

Решив уравнение (5.7) относительно расхода Q , получим зависимость, которой можно воспользоваться для определения диаметра d графоаналитическим методом, т. е. с построением графика $Q = f(d)$. При

построении полагаем работу трубопровода в области квадратичного сопротивления:

$$Q = \sqrt{2g3,5} \frac{1}{\sqrt{1 + 2\zeta_{н.л.н} + \zeta_{кл.с} + \frac{\lambda 52}{d}}},$$

или в более удобной для расчетов форме:

$$Q = 6,49 \frac{d^2}{\sqrt{1 + 2\zeta_{н.л.н} + \zeta_{кл.с} + \frac{\lambda 52}{d}}}. \quad (5.8)$$

Для определения необходимой величины диаметра примем несколько (не менее четырех) произвольных стандартных значений диаметра d и вычислим отвечающие им значения расхода Q . При этом будем задаваться такими величинами d , чтобы получать величины расхода Q и меньше, и больше заданного. Результаты вычислений представим следующим образом:

Внутренний диаметр d , м	0,10	0,15	0,20	0,25
$\lambda = 0,11 (\Delta_{\text{Э}}/d)^{0,25}$	0,035	0,031	0,029	0,028
$\zeta_{кл.с} = f(d)$ (см. прилож. 6)	7	6	5,2	4,4
Коэффициент сопротивления колена с закруглением ($\alpha = 90^\circ$) $\zeta_{кл.н} = f(d)$ (см. прилож. 6)	0,5	0,45	0,3	0,30
Расход воды Q , м ³ /с	0,0115	0,031	0,0634	0,109

По вышеприведенным данным построен график зависимости расхода воды Q от внутреннего диаметра d трубопровода (рис. 5.2.8), из которого видно, что диаметр, отвечающий заданному расходу, $d_{\text{иск}} = 0,182$ м.

За расчетный диаметр принимаем ближайший больший стандартный $d = 0,20$ м (значения стандартных диаметров d труб см. в прилож. 10).

Для построения графика напоров вычислим потери напора по длине и в каждом местном сопротивлении при расчетном диаметре труб $d = 0,20$ м, предварительно установив с помощью графика Г.А. Мурина (см. прилож. 5) область гидравлического сопротивления, в которой будет работать трубопровод.

С этой целью вычислим по формуле (4.9) число Рейнольдса Re и относительную шероховатость $\Delta_{\text{Э}} / d_p$. Предварительно определим среднюю скорость потока:

$$v = Q / \omega = 0,050 \cdot 4 / 3,14 \cdot 0,2^2 = 1,59 \text{ м/с.}$$

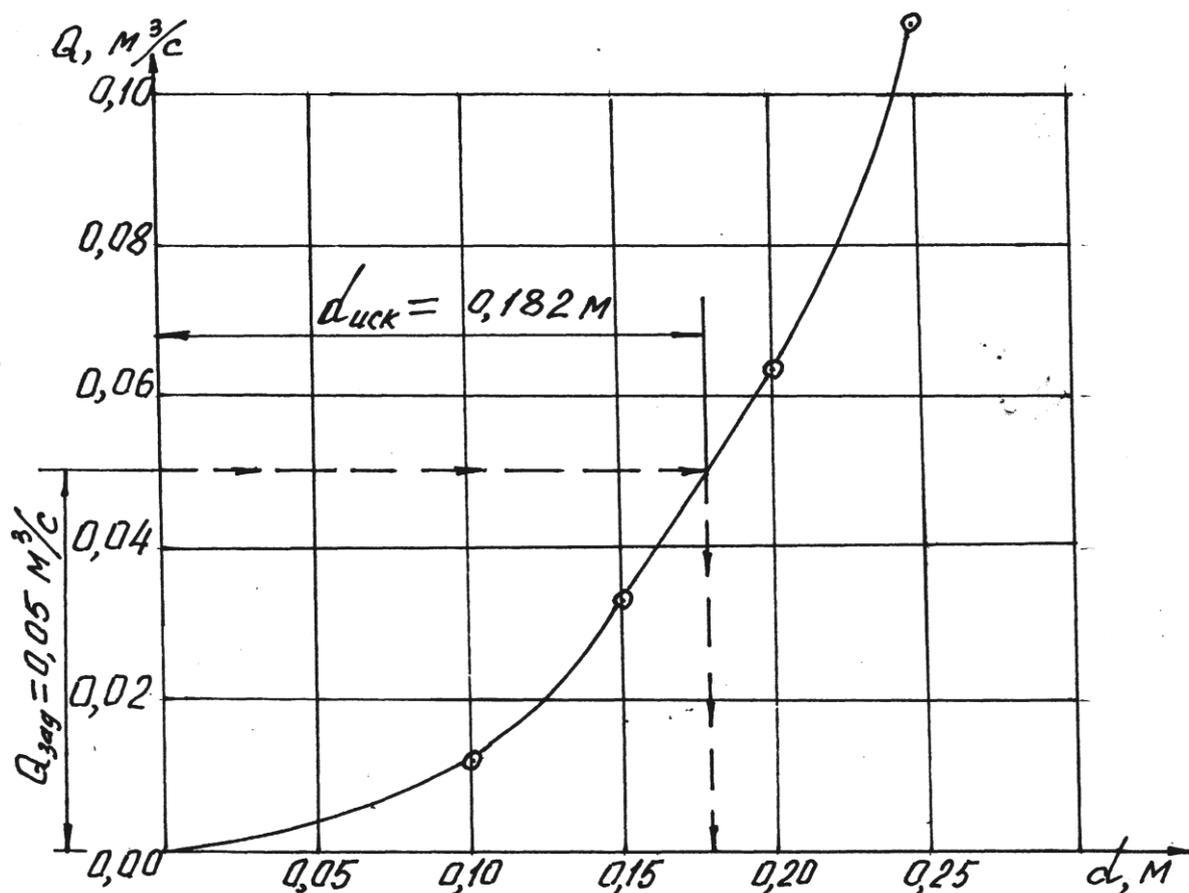


Рис. 5.2.8. График зависимости расхода воды Q от диаметра трубопровода d (к задаче 5.2.4)

Число Рейнольдса

$$Re = 1,59 \cdot 0,20 / 1,15 \cdot 10^{-6} = 276932;$$

$$\Delta z / d_p = 1,0 / 200 = 0,005.$$

Обратившись к графику Мурина, убеждаемся, что трубопровод работает в области квадратичного сопротивления.

Для удобства вычисления потерь напора (по длине и местных) определим величину скоростного напора: $v^2 / 2g = 1,59^2 / 2 \cdot 9,81 = 0,13$ м, через который и выразим потери полного напора h_{W1-2} для решаемой задачи:

$$h_{W1-2} = h_l + \sum h_m = \lambda \frac{l \cdot v^2}{d \cdot 2g} + \zeta_{кл.с} \frac{v^2}{2g} + \zeta_{пл.л} \frac{v^2}{2g} + \zeta_3 \frac{v^2}{2g} + \zeta_{вых} \frac{v^2}{2g} =$$

$$= \frac{v^2}{2g} \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta_{кл.с} + 2\zeta_{пл.л} + \zeta_3 + \zeta_{вых} \right),$$

где ζ_3 – коэффициент сопротивления полностью открытой задвижки ($\zeta_3 = 0,15$ (см. прилож. 6)); $\zeta_{вых}$ – коэффициент сопротивления при выходе потока из трубопровода в водоем ($\zeta_{вых} = 1,0$).

Подставляя в формулу все вышеназванные величины, получим:

$$h_{w1-2} = 0,13 \cdot (0,029 \cdot 58 / 0,2 + 5,2 + 2 \cdot 0,33 + 0,15 + 1) = 2,0 \text{ м.}$$

Заметим, что для условий данной задачи суммарные потери напора должны быть равны разности уровней воды в водоемах H . Это следует из уравнения Д. Бернулли, если его записать для сечений I-I и II-II (см. рис. 5.2.7). Итак, $h_l = 1,09$ м (в том числе на горизонтальном участке 0,88 м); $h_{кл.с} = 0,68$ м; $2h_{пл.н} = 0,08$ м; $h_3 = 0,02$ м; $h_{вых} = 0,13$ м. Располагая этими данными, выбираем масштабы (горизонтальный – 1:500, вертикальный – 1:25) и строим график напоров (рис. 5.2.9), зная из вышеизложенного, что в данном случае начальный напор $H_{нач}$, т. е. напор в сечении I-I при плоскости сравнения, совпадающей с сечением II-II, составляет 2 м, а конечный напор $H_{кон}$, т. е. в сечении II-II, равен нулю.

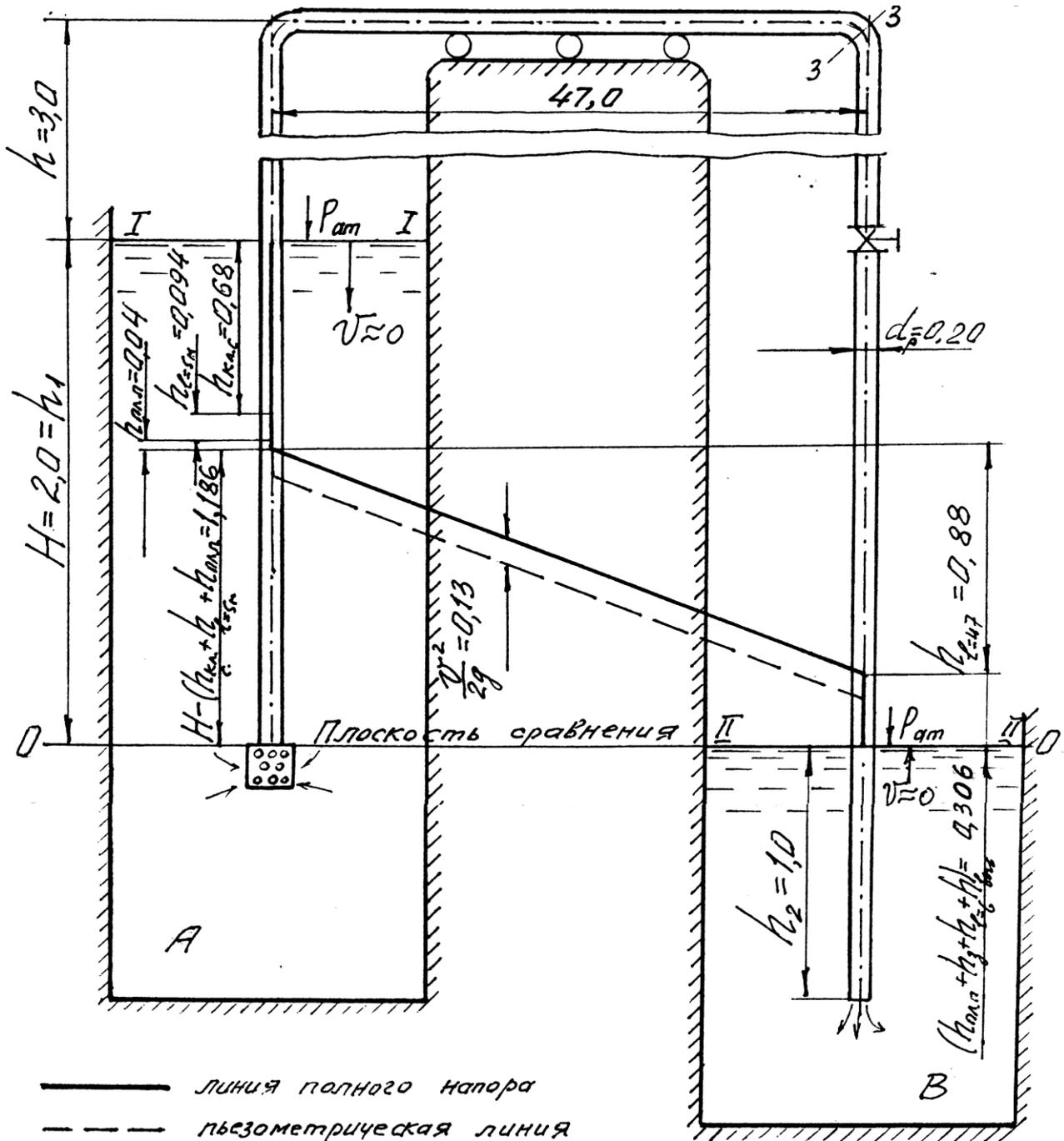
Сначала построим линию полного напора, вычитая из его начальной величины потери, нарастающие по пути потока.

Пьезометрическую линию получим, вычитая из полного напора в рассматриваемых сечениях скоростной напор.

Задача 5.2.5. Центробежный насос забирает из резервуара (рис. 5.2.10) воду. Расход воды $Q = 0,018 \text{ м}^3/\text{с}$, температура $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$. Вакуумметрическое давление перед входом в насос, показываемое вакуумметром B , составляет $p_{вак} = 50$ кПа. Общая длина всасывающего трубопровода $l = 30$ м. Трубы чугунные нормальные с внутренним диаметром $d = 0,15$ м. На трубопроводе имеются обратный клапан с сеткой, плавный поворот на 90° радиусом $R_n = 2d = 0,30$ м и задвижка Лудло, степень открытия которой $a/d = 0,5$.

Определить высоту установки насоса $H_{вс}$, т. е. превышение горизонтальной оси насоса над уровнем воды в резервуаре, и построить график напоров. Глубина погружения входного сечения всасывающего трубопровода $h_{вс} = 1,5$ м.

Решение. Величину $H_{вс}$ найдем прямой подстановкой величин в уравнение Д. Бернулли (4.4), поскольку Q и d заданы. Применительно к условиям задачи уравнение Д. Бернулли запишем для сечений I-I (совпадает с уровнем воды в резервуаре) и II-II (перед входом в насос, там, где подключен вакуумметр), приняв за плоскость сравнения горизонтальную плоскость, совпадающую с уровнем воды в резервуаре, т. е. с сечением I-I (рис. 5.2.10). Выбор именно этих сечений обусловлен тем, что для них известно наибольшее число слагаемых трехчлена $(z + p/\rho g + \alpha v^2/2g)$.



Масштабы: горизонтальный 1:500
 вертикальный 1:25

Размеры даны в метрах

Диаметр d трубопровода изображен не в масштабе

Рис. 5.2.9. График напоров (к задаче 5.2.4)

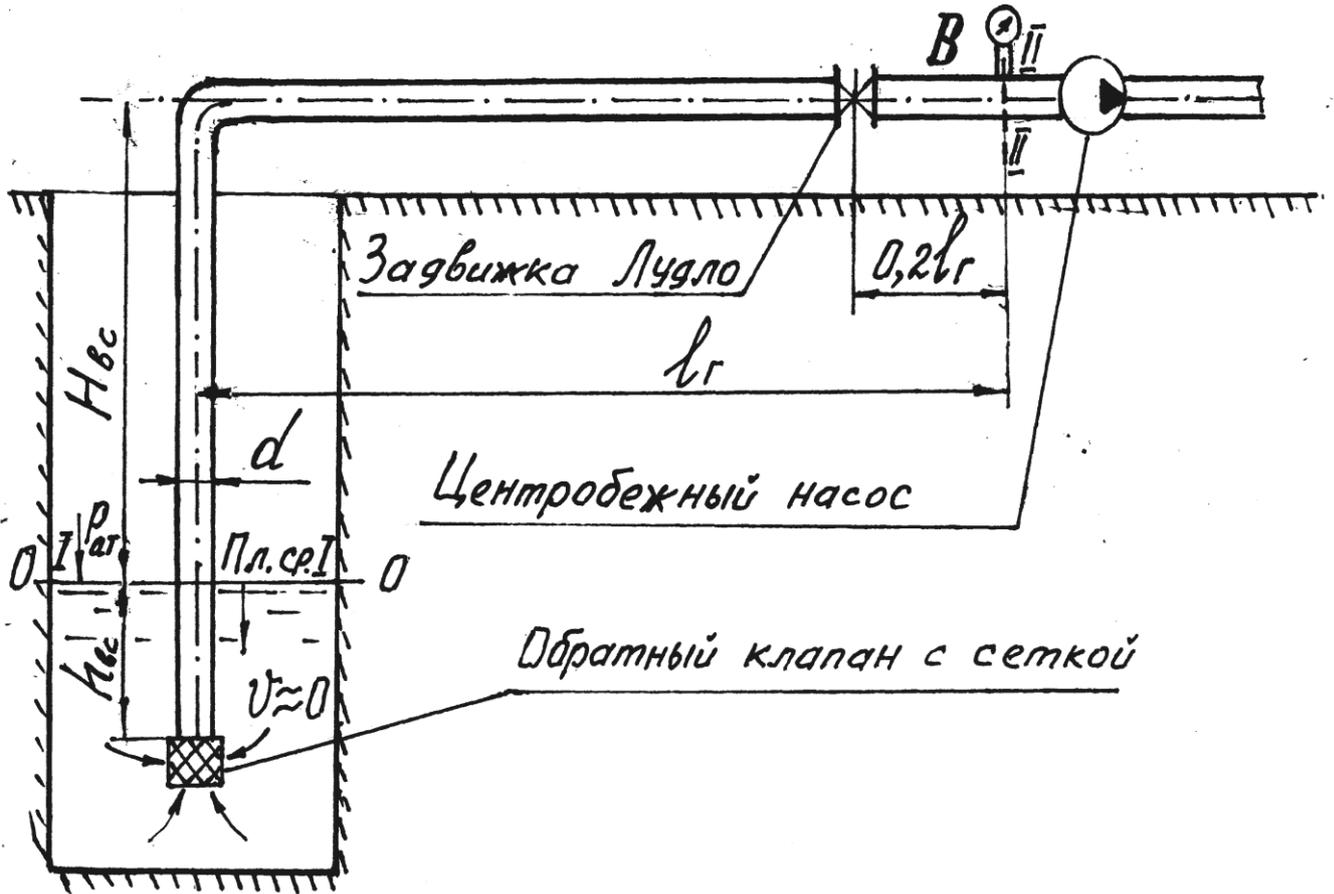


Рис. 5.2.10. Схема к гидравлическому расчету всасывающего трубопровода насоса (к задаче 5.2.5)

Для выбранных сечений, плоскости сравнения и принятых обозначений слагаемые уравнения Д. Бернулли примут вид:

$$z_1 = 0; p_{1изб}/\rho g = 0; \alpha_1 v_1^2/2g \approx 0;$$

$$z_2 = H_{вс}; p_{2изб}/\rho g = -50 \cdot 10^3 / 1000 \cdot 9,81; \alpha_2 v_2^2/2g = v^2/2g;$$

$$h_{w1-2} = h_1 + \sum h_m = \lambda \frac{lv^2}{d2g} + \zeta_{o.k.c.} \frac{v^2}{2g} + \zeta_{n.l.n} \frac{v^2}{2g} + \zeta_3 \frac{v^2}{2g}.$$

Разрешив уравнение Д. Бернулли относительно $H_{вс}$, получим:

$$H_{вс} = \frac{50000}{1000 \cdot 9,81} - \frac{v^2}{2g} \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \zeta_{o.k.c.} + \zeta_{n.l.n} + \zeta_3 \right), \quad (5.9)$$

где $v = Q/\omega = 4Q/\pi d^2$ – средняя скорость потока воды в трубопроводе, м/с; λ – коэффициент гидравлического трения; $\zeta_{o.k.c.}$ – коэффициент сопротивления обратного клапана с сеткой; $\zeta_{n.l.n}$ – коэффициент сопротивления плавного поворота; ζ_3 – коэффициент сопротивления задвижки Лудло при $a/d = 0,5$.

Как видим, задача по определению $H_{вс}$ сводится к определению потерь напора по длине и местных, а фактически – к нахождению коэффициентов гидравлического трения и местных сопротивлений.

Прежде всего выясним режим движения воды и область гидравлического сопротивления, в которой будет работать трубопровод. С этой целью вычислим по уравнению (4.6) среднюю скорость потока: $v = 4Q/\pi d^2 = 0,018 \cdot 4 / 3,14 \cdot 0,15^2 = 1,02$ м/с, а затем число Рейнольдса по формуле (4.9), предварительно найдя в прилож. 1 коэффициент кинематической вязкости воды ν при $t = 15$ °С ($\nu = 1,15 \cdot 10^{-6}$ м²/с):

$$Re = vd/\nu = 1,02 \cdot 0,15 / 1,15 \cdot 10^{-6} = 153000 / 1,15 = 133043.$$

$Re > Re_{кр} = 2320$, следовательно, режим движения воды в трубопроводе турбулентный, поэтому для установления области гидравлического сопротивления необходимо вычислить относительную шероховатость трубопровода $\Delta_{э}/d$, приняв предварительно величину $\Delta_{э}$ по таблице в прилож. 4 ($\Delta_{э} = 1,0$ мм), $\Delta_{э}/d = 1 / 150 = 0,0067$.

Имея Re и $\Delta_{э}/d$, обращаемся к графику Г.А. Мурина (см. прилож. 5) и с его помощью устанавливаем, что трубопровод будет работать в области квадратичного сопротивления, где коэффициент $\lambda = f(\Delta_{э}/d)$, и может быть вычислен, например, по формуле (4.16):

$$\lambda = 0,11(\Delta_{э}/d)^{0,25} = 0,11(1/50)^{0,25} = 0,032.$$

Величины коэффициентов местных сопротивлений находим в прилож. 6 ($\zeta_{о.к.с} = 6,5$; $\zeta_{пл.п} = 0,37$; $\zeta_3 = 5,3$).

Подставив найденные и заданные величины в выражение (5.9), найдем высоту установки насоса $H_{вс}$:

$$H_{вс} = 5,10 - (1,02^2 / 2 \cdot 9,81) [1 + 0,032 (30 / 0,15 + 6,5 + 0,37 + 5,3)] = \\ = 5,10 - (0,053 + 0,34 + 0,34 + 0,02 + 0,28) = 5,10 - 1,03 = 3,97 \text{ м.}$$

Имея скоростной напор, потери напора по длине и в местных сопротивлениях, приступаем к построению графика напоров. Выбрав масштабы (горизонтальный – 1:200 и вертикальный – 1:20), вычерчиваем трубопровод и обозначаем на нем сечения I-I и II-II и плоскость сравнения 0-0, совпадающую с сечением I-I (рис. 5.2.11). Линию полного напора строим, последовательно вычитая потери напора, нарастающие вдоль потока, из начального напора $H_{нач}$ (заданного пьезометрическим уровнем в резервуаре). Величина этого напора равна нулю, т. е. пьезометрический уровень в данном случае совпадает с плоскостью сравнения. Пьезометрическую линию строим, вычитая скоростной напора из полного напора в выбранных сечениях трубопровода.

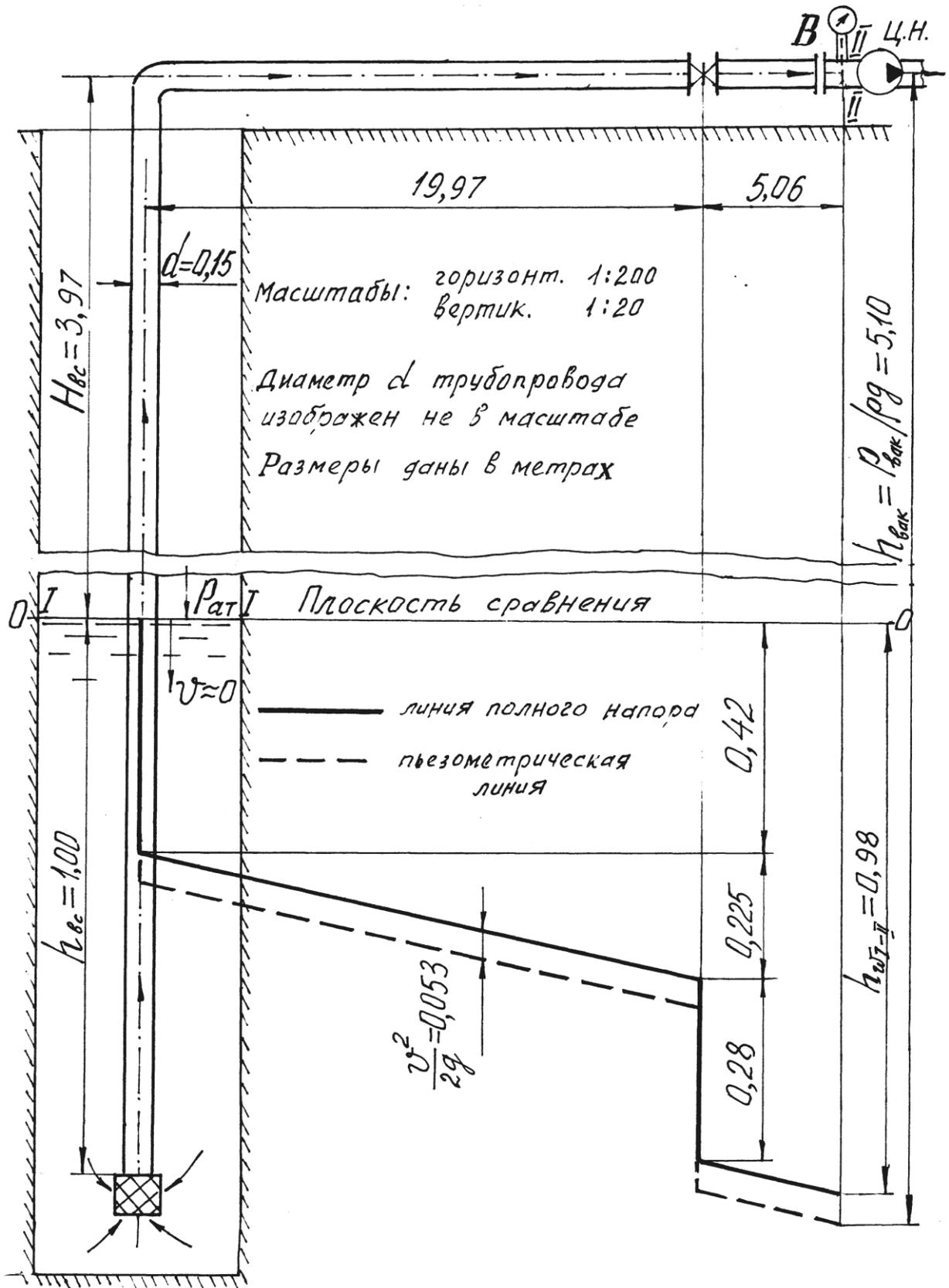


Рис. 5.2.11. График напоров (к задаче 5.2.5)

5.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 5.3.1. Температура воды $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$.

Определить напор H , необходимый для пропуска заданного расхода Q через систему коротких трубопроводов (рис. 5.3.1).

Построить линии потенциальной и полной удельных энергий для данных табл. 5.3.1.

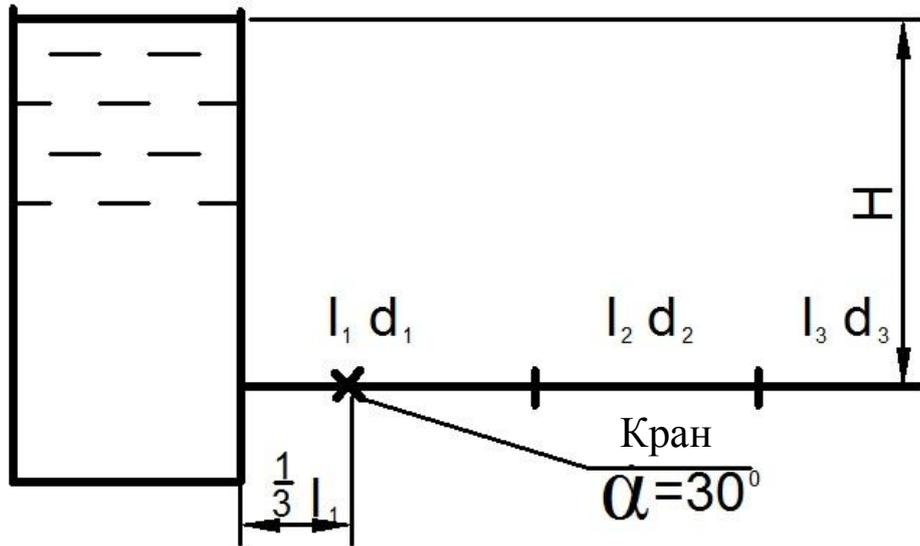


Рис. 5.3.1. К задаче 5.3.1

Таблица 5.3.1

Обозначения	Размерность	Номера вариантов					
		1	2	3	4	5	6
Q	л/с	10	20	30	40	50	60
l_1	м	100	120	80	60	50	45
l_2	м	200	150	130	110	90	80
l_3	м	150	100	90	80	70	60
d_1	мм	200	300	250	350	400	300
d_2	мм	300	200	200	300	350	300
d_3	мм	250	250	300	400	400	300
Δg	мм	0,50	1,05	0,50	0,75	1,15	1,0

Задача 5.3.2. Определить напор H , необходимый для пропуска заданного расхода Q через систему коротких трубопроводов (рис. 5.3.2).

При данных, указанных в табл. 5.3.2, построить линии потенциальной и полной удельных энергий.

Температура воды $t = 15\text{ }^\circ\text{C}$.

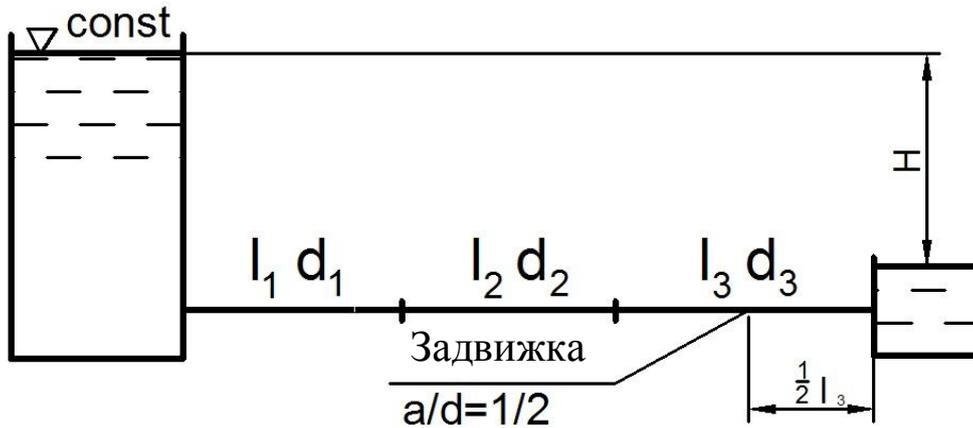


Рис. 5.3.2. К задаче 5.3.2

Таблица 5.3.2

Обозначения	Размерность	Номера вариантов					
		1	2	3	4	5	6
Q	л/с	5	7,5	10	12,5	15	20
l_1	м	20	30	40	25	35	45
l_2	м	80	90	100	85	95	105
l_3	м	60	70	80	75	65	55
d_1	мм	125	150	100	125	150	150
d_2	мм	150	175	125	150	100	125
d_3	мм	125	150	75	100	125	150
Δg	мм	0,35	0,50	0,10	0,5	0,25	0,15

Задача 5.3.3. Определить напор H , необходимый для пропуска заданного расхода Q через систему коротких трубопроводов (рис. 5.3.3).

Построить линии потенциальной и полной удельных энергий при данных, указанных в табл. 5.3.3.

Температура воды $t = 17^\circ\text{C}$.

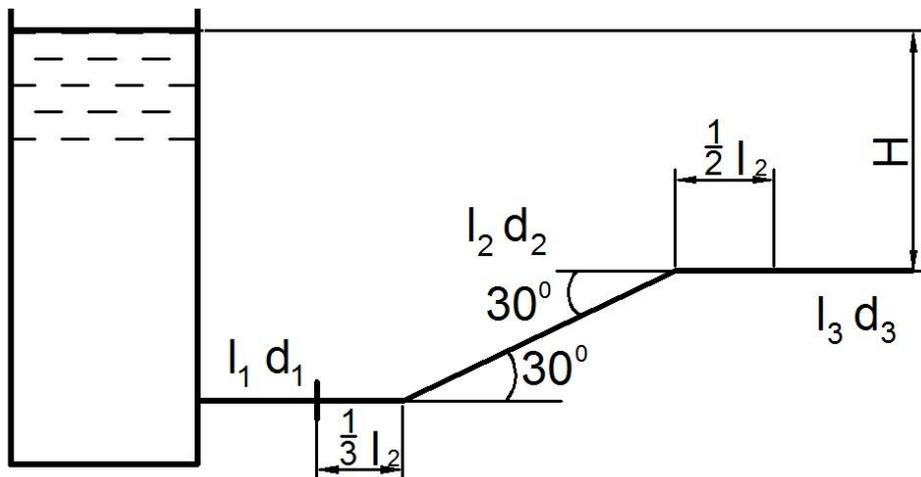


Рис. 5.3.3. К задаче 5.3.3

Таблица 5.3.3

Обозначения	Размерность	Номера вариантов					
		1	2	3	4	5	6
Q	л/с	10	20	30	15	25	35
l_1	м	70	80	90	100	95	85
l_2	м	150	160	170	180	190	200
l_3	м	100	95	85	80	75	70
d_1	мм	200	250	300	250	400	125
d_2	мм	150	300	400	300	300	300
d_3	мм	125	125	250	225	250	250
Δ	мм	0,15	0,35	1,0	0,55	0,75	1,1

Задача 5.3.4. Определить напор H , необходимый для пропуска заданного расхода Q через систему коротких трубопроводов, показанную на рис. 5.3.4.

Построить линии потенциальной и полной удельных энергий при данных, указанных в табл. 5.3.4.

Температура воды $t = 14\text{ }^\circ\text{C}$.

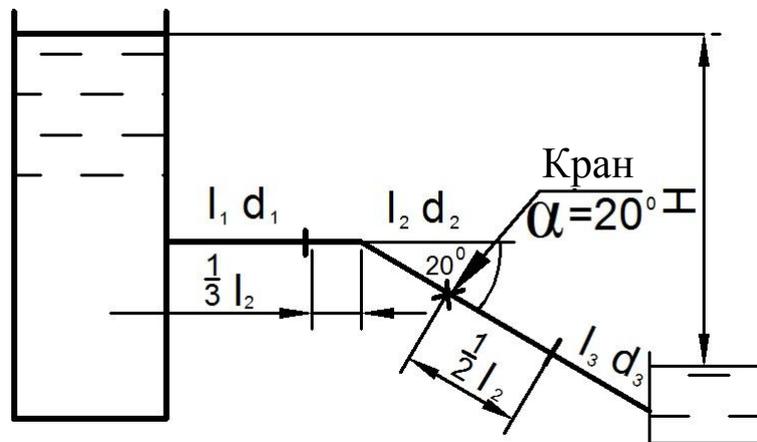


Рис. 5.3.4. К задаче 5.3.4

Таблица 5.3.4

Обозначения	Размерность	Номера вариантов					
		1	2	3	4	5	6
Q	л/сек	6	12	18	20	14	7
l_1	м	60	70	80	70	60	50
l_2	м	100	110	120	130	120	110
l_3	м	40	30	20	30	40	50
d_1	мм	100	125	200	200	200	250
d_2	мм	75	100	250	300	225	300
d_3	мм	100	150	175	250	150	150
Δ	мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1

Задача 5.3.5. Определить напор H , необходимый для пропуска заданного расхода Q через систему коротких трубопроводов (рис. 5.3.5). Высота выступа шероховатости $\Delta = 1$ мм. Температура воды $t = 13$ °С. На первой трубе установлен кран, степень закрытия которого характеризуется углом $\alpha = 30^\circ$.

Построить линии потенциальной и полной удельных энергий.

Расчет провести при данных, указанных в табл. 5.3.5.

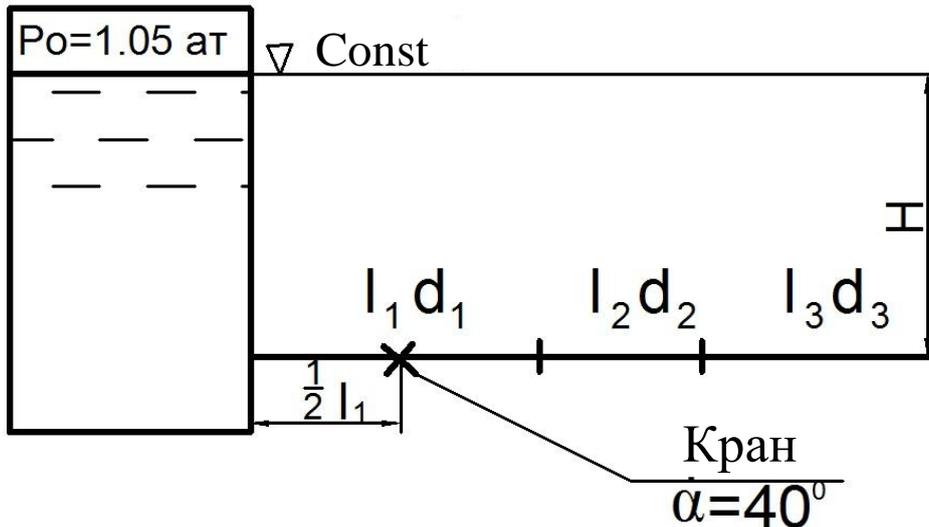


Рис. 5.3.5. К задаче 5.3.5

Таблица 5.3.5

Обозначения	Размерность	Номера вариантов					
		1	2	3	4	5	6
Q	л/с	3	6	9	12	15	18
l_1	м	120	130	140	150	160	170
l_2	м	60	65	70	75	80	85
l_3	м	100	110	120	130	140	150
d_1	мм	50	50	100	150	150	300
d_2	мм	25	75	125	200	225	250
d_3	мм	75	25	75	175	150	225

Задача 5.3.6. Определить напор H , необходимый для пропуска заданного расхода Q через систему коротких трубопроводов (рис. 5.3.6).

Построить линии потенциальной и полной удельных энергий при данных, указанных в табл. 5.3.6.

Температура воды $t = 13$ °С.

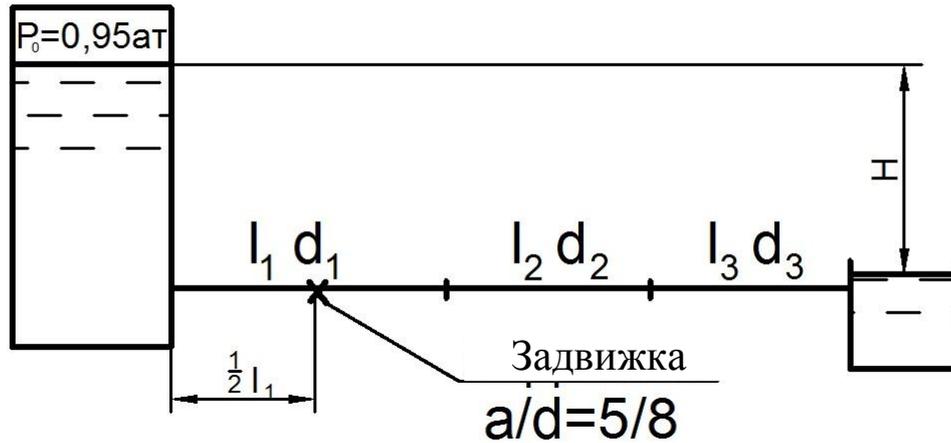


Рис. 5.3.6. К задаче 5.3.6

Таблица 5.3.6

Обозначения	Размерность	Номера вариантов					
		1	2	3	4	5	6
Q	л/с	20	25	30	35	25	20
l_1	м	120	125	130	135	140	130
l_2	м	80	90	95	100	105	100
l_3	м	60	65	70	75	80	85
d_1	мм	100	125	250	175	200	250
d_2	мм	200	150	200	250	225	300
d_3	мм	150	200	225	200	250	200
Δ	мм	0,15	0,25	0,5	1,00	0,75	0,10

Задача 5.3.7. Определить расход Q через заданную систему коротких трубопроводов, показанную на рис. 5.3.7.

Построить линии потенциальной и полной удельных энергий.

Расчет провести по данным, приведенным в табл. 5.3.7.

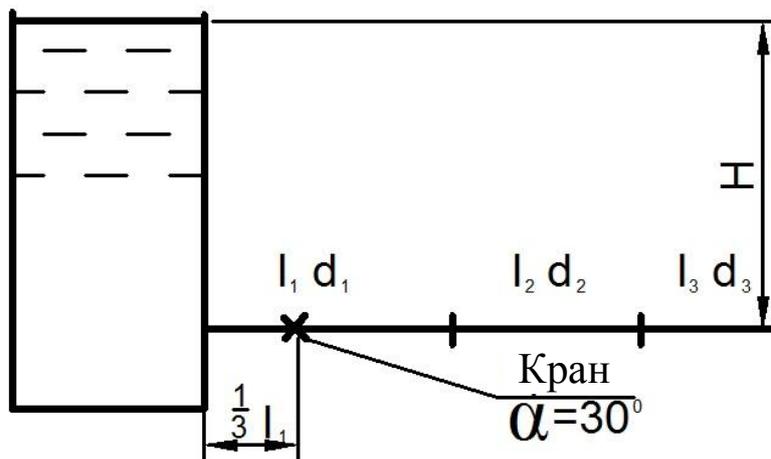


Рис. 5.3.7. К задаче 5.3.7

Таблица 5.3.7

Обозначения	Размерность	Номер варианта					
		1	2	3	4	5	6
H	м	30	28	26	24	22	20
l_1	м	200	190	180	170	160	150
l_2	м	160	140	130	120	110	100
l_3	м	90	85	80	75	70	65
d_1	мм	100	125	150	200	150	175
d_2	мм	125	150	125	100	100	250
d_3	мм	75	50	175	150	125	200

Задача 5.3.8. Определить расход Q через заданную систему коротких трубопроводов, показанную на рис. 5.3.8.

Построить линии потенциальной и полной удельных энергий при данных, приведенных в табл. 5.3.8.

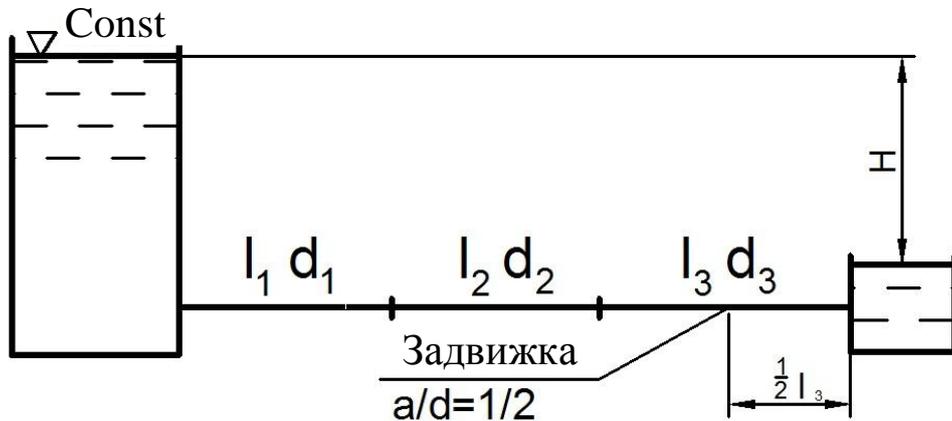


Рис. 5.3.8. К задаче 5.3.8

Таблица 5.3.8

Обозначения	Размерность	Номер варианта					
		1	2	3	4	5	6
H	м	10	8	12	14	16	15
l_1	м	100	105	110	115	120	125
l_2	м	110	115	120	125	130	135
l_3	м	90	95	100	105	110	115
d_1	мм	150	200	300	250	200	250
d_2	мм	200	250	250	300	275	300
d_3	мм	175	300	275	225	225	200

Задача 5.3.9. Определить расход Q через заданную систему коротких трубопроводов (рис. 5.3.9).

Построить линии потенциальной и полной удельных энергий при данных, указанных в табл. 5.3.9.

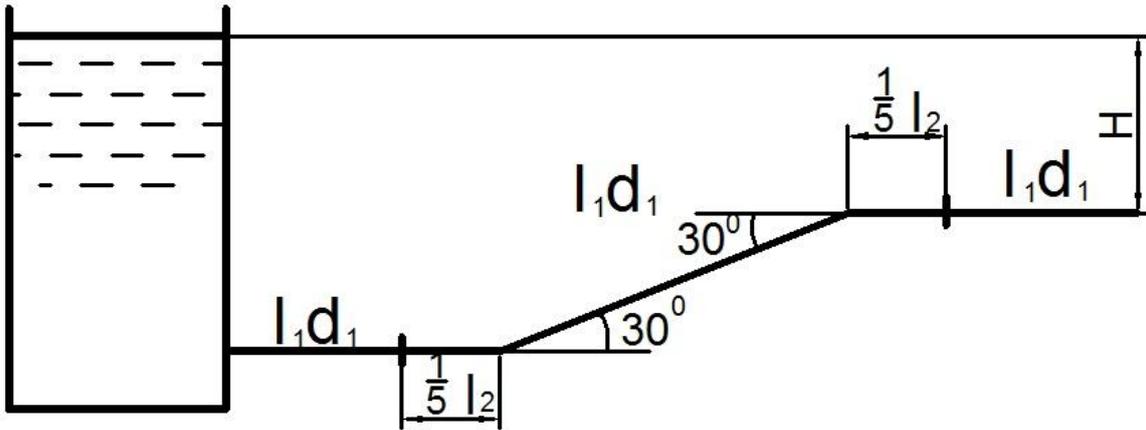


Рис. 5.3.9. К задаче 5.3.9

Таблица 5.3.9

Обозначения	Размерность	Номер варианта					
		1	2	3	4	5	6
H	м	15	17	21	25	24	22
l_1	м	100	110	120	130	130	125
l_2	м	90	95	105	115	135	120
l_3	м	60	80	90	95	105	90
d_1	мм	200	225	200	250	300	200
d_2	мм	250	250	250	300	225	225
d_3	мм	225	200	225	225	250	250

Задача 5.3.10. Определить расход Q через заданную систему коротких трубопроводов (рис. 5.3.10).

Построить линии потенциальной и полной удельных энергий при данных, указанных в табл. 5.3.10.

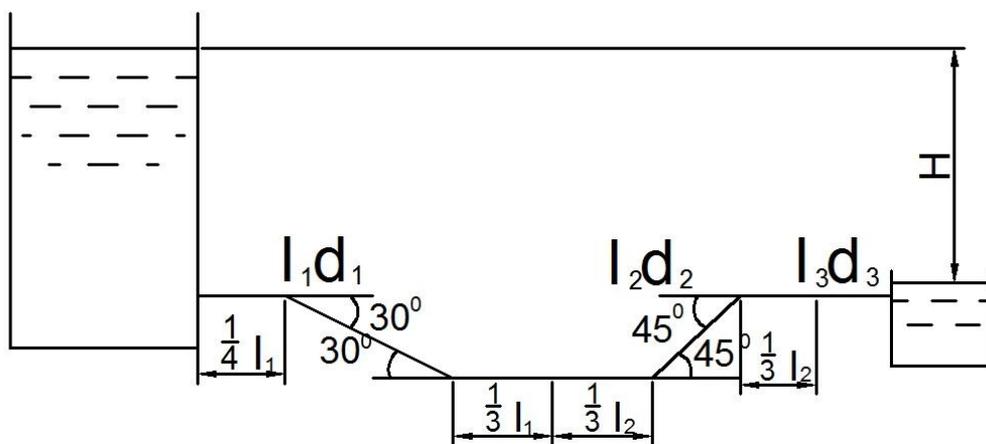


Рис. 5.3.10. К задаче 5.3.10

Таблица 5.3.10

Обозначения	Размерность	Номер варианта					
		1	2	3	4	5	6
H	м	20	25	30	35	27	21
l_1	м	100	110	120	130	140	150
l_2	м	150	160	170	180	190	200
l_3	м	70	80	90	100	110	120
d_1	мм	250	300	250	300	150	250
d_2	мм	200	275	200	250	250	300
d_3	мм	225	350	225	275	175	225

Задача 5.3.11. Определить расход Q через заданную систему коротких трубопроводов (рис. 5.3.11).

При данных, приведенных в табл. 5.3.11, построить линии потенциальной и полной удельных энергий.

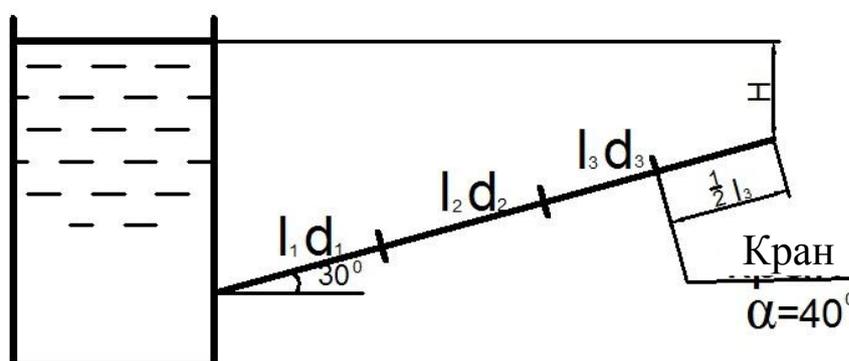


Рис. 5.3.11. К задаче 5.3.11

Таблица 5.3.11

Обозначения	Размерность	Номер варианта						
		1	2	3	4	5	6	7
H	м	12	15	17	21	23	25	29
l_1	м	50	60	70	75	80	85	90
l_2	м	80	90	95	100	105	110	115
l_3	м	105	110	115	120	130	140	145
d_1	мм	250	250	300	300	200	225	150
d_2	мм	300	275	250	200	250	250	200
d_3	мм	225	200	275	250	300	200	225

Задача 5.3.12А. Определить расход Q через заданную систему коротких трубопроводов (рис. 5.3.12).

Построить линии потенциальной и полной удельных энергий согласно данным, указанным в табл. 5.3.12.

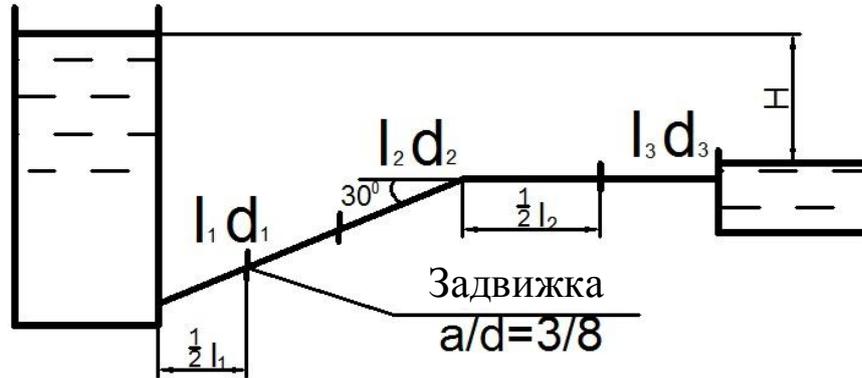


Рис. 5.3.12. К варианту А задачи 5.3.12

Таблица 5.3.12

Обозначения	Размерность	Номер варианта					
		1	2	3	4	5	6
H	м	15	18	20	22	24	26
l_1	м	50	55	60	65	70	75
l_2	м	100	110	120	130	140	150
l_3	м	50	55	60	65	70	75
d_1	мм	100	300	250	200	175	150
d_2	мм	75	250	200	250	250	200
d_3	мм	125	275	225	225	200	150

Задача 5.3.12Б. Определить напор H над центром выходного отверстия для пропуска заданного расхода Q через систему коротких водопроводов и построить линию полной удельной энергии и пьезометрическую линию.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.13 при расположении труб, как на рис. 5.3.13. Трубы нормальные, высота шероховатости стенок $\Delta = 1,35$ мм. Температура воды $t = 20$ °С.

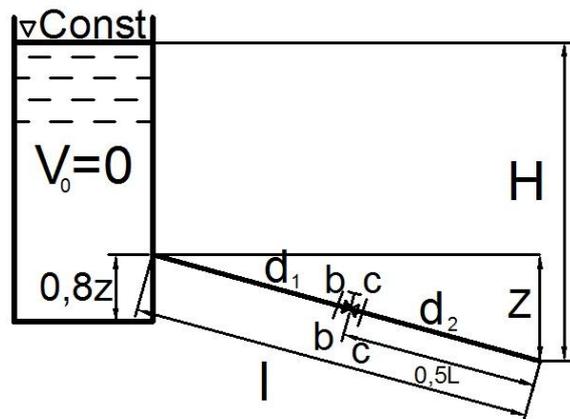


Рис. 5.3.13. К задаче 5.3.12Б

Таблица 5.3.13

№ варианта	Q , л/с	d_1 , мм	d_2 , мм	l , м	z , м	t°
1	4	50	75	40	0,6	10
2	9	75	100	80	0,8	12
3	15	125	100	100	1,0	15
4	12	100	125	140	1,2	20
5	35	150	200	150	1,2	15
6	50	200	150	80	1,0	10

Задача 5.3.13. Определить напор H , необходимый для пропуска заданного расхода через систему коротких водопроводов, и построить линию полной удельной энергии и пьезометрическую линию при расположении труб, как на рис. 5.3.14. Вычислить удельную потенциальную энергию в обоих случаях для сечений b-b и c-c. Трубы чугунные новые ($\Delta \approx 0,5$ мм). Температура воды t , $^\circ\text{C}$

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.14.

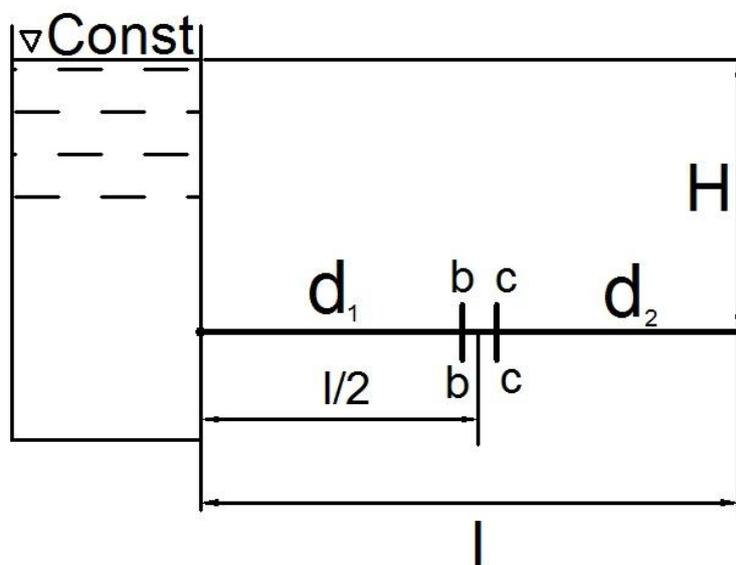


Рис. 5.3.14. К задаче 5.3.13

Таблица 5.3.14

№ варианта	Q , л/с	d_1 , мм	d_2 , мм	l , м	t°
1	8	50	75	8	20
2	9	75	50	14	15
3	10	75	50	12	12
4	11	50	75	8	10
5	8	100	75	40	20
6	9	50	100	20	20

Задача 5.3.14. Определить диаметр d_2 на втором участке водопровода, который при заданных значениях d_1 , l_1 , l_2 , h_1 и z пропустит расход Q (рис. 5.3.15). Трубы гидравлически шероховатые, высота выступов шероховатости стенок труб $\Delta = 1,35$ мм ($n = 0,012$). Температура воды $t = 10$ °С.

Построить линию полной удельной энергии и пьезометрическую линию (при принятом диаметре d_2).

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.15.

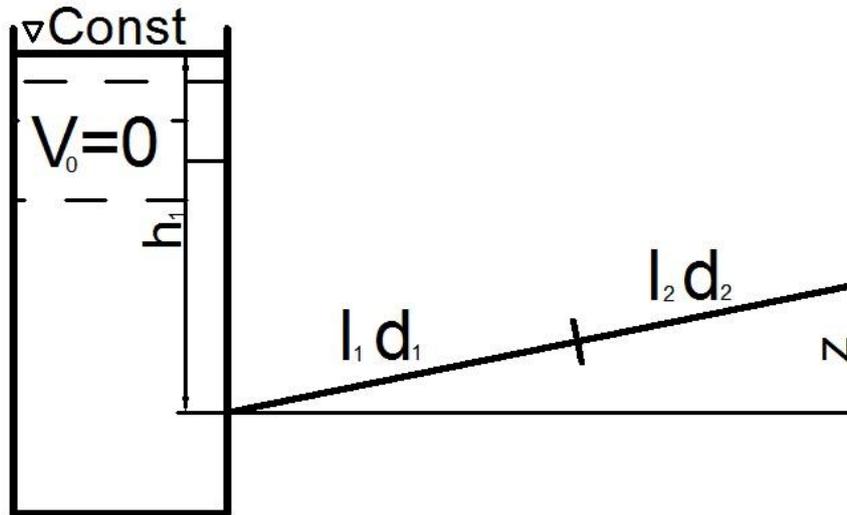


Рис. 5.3.15. К задаче 5.3.14

Таблица 5.3.15

№ варианта	d_1 , мм	l_1 , м	l_2 , м	h_1 , м	z , м	Q , л/с
1	75	20	11	4,0	1,0	4
2	50	10	73	7,4	1,4	6
3	100	67	20	5,0	1,5	8
4	75	20	90	5,7	1,7	10
5	125	50	50	6,7	1,7	15
6	100	39	80	8,5	2,0	20

Задача 5.3.15. Определить скорость истечения и расход воды при заданных значениях h , z , l_1 , l_2 (рис. 5.3.16) и диаметре трубы d . Трубы нормальные. Высота выступов шероховатости $\Delta \approx 1,35$ мм. Температура воды $t = 20$ °С. Угол открытия крана – α .

Построить линию полной удельной энергии и пьезометрическую линию.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.16.

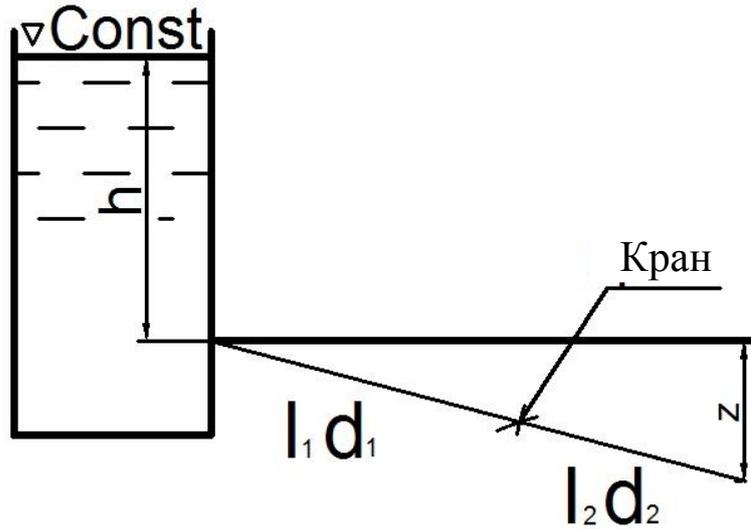


Рис. 5.3.16. К задаче 5.3.15

Таблица 5.3.16

№ варианта	d , мм	h , м	z , м	l_1 , м	l_2 , м	α , °
1	75	7,0	2,0	30	10	20
2	100	7,0	1,0	40	20	30
3	125	5,8	1,2	20	50	30
4	150	4,5	1,5	70	10	20
5	200	3,3	1,7	80	20	30
6	250	3,0	1,0	30	70	40

Задача 5.3.16. Определить расход Q через систему коротких водопроводов при заданных напоре, диаметрах d_1 , d_2 (рис. 5.3.17). Построить линию полной удельной энергии и пьезометрическую линию.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.17.

Трубы нормальные, высота выступов шероховатости стенок $\Delta = 1,35$ мм. Температура воды t , °С.

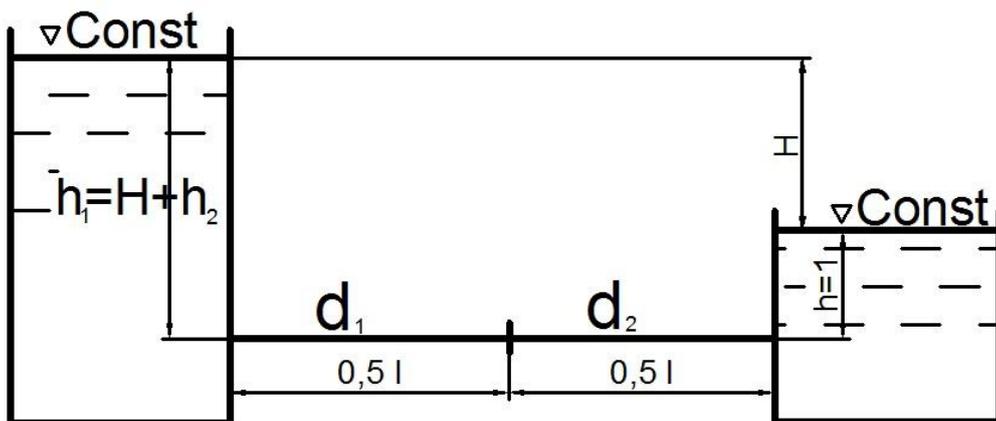


Рис. 5.3.17. К задаче 5.3.16

Таблица 5.3.17

№ варианта	H , м	d_1 , м	d_2 , м	l , м	t , °С
1	7	75	50	60	20
2	6	75	100	80	15
3	5	125	100	100	12
4	4	125	150	80	10
5	3	200	150	50	10
6	2	200	250	40	12

Задача 5.3.17. Определить напор H , необходимый для подачи расхода Q через систему коротких трубопроводов (рис. 5.3.18). Высота выступа шероховатости $\Delta = 1,35$ мм. Температура воды $t = 15$ °С. На второй трубе установлен кран, степень закрытия которого характеризуется углом α° .

Построить линии потенциальной и полной удельных энергий.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.18.

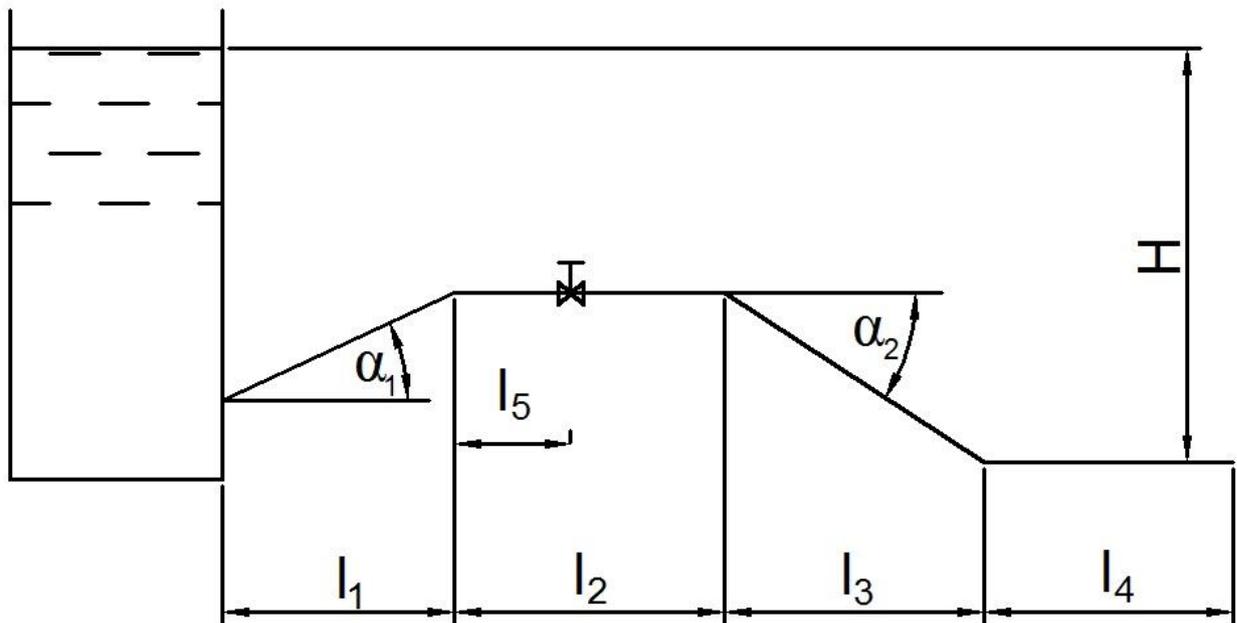


Рис. 5.3.18. К задаче 5.3.17

Таблица 5.3.18

Обозначения	Размерность	Номер варианта					
		1	2	3	4	5	6
l	2	3	4	5	6	7	8
Q	л/с	17	23	29	35	41	44
d_1	мм	100	125	200	150	175	250
d_2	мм	125	150	250	225	250	200
d_3	мм	75	100	175	200	225	225
d_4	мм	100	150	200	175	200	200

Окончание табл. 5.3.18

l	2	3	4	5	6	7	8
l_1	м	60	65	70	75	80	85
l_2	м	100	110	120	130	140	150
l_3	м	40	50	60	65	70	75
l_4	м	30	25	40	42	53	38
l_5	м	20	25	30	40	50	60
α_1°	град	30	30	40	45	45	60
α_2°	град	135	30	150	120	120	165
α_3°	град	10	150	20	20	30	30

Задача 5.3.18. Определить величину давления p , необходимого для подачи расхода Q через систему коротких трубопроводов (рис. 5.3.19). Отметки горизонтов воды в обоих резервуарах постоянны. Высота выступа шероховатости $\Delta = 1,35$ мм. Степень закрытия задвижки, установленной на четвертой трубе, характеризуется отношением a/d .

Построить линии потенциальной и полной удельных энергий.

Расчет провести при данных, приведенных в табл. 5.3.19.

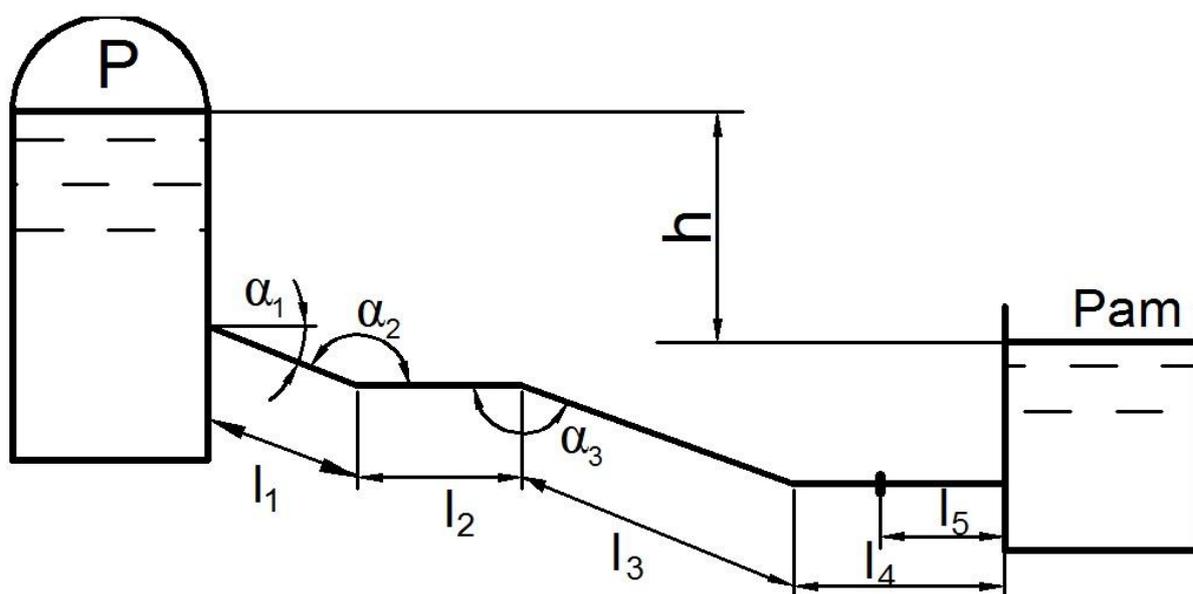


Рис. 5.3.19. К задаче 5.3.18

Таблица 5.3.19

Обозначения	Размерность	Номер варианта					
		1	2	3	4	5	6
l	2	3	4	5	6	7	8
Q	л/с	19	23	28	33	42	47
d_1	мм	100	150	200	200	250	250
d_2	мм	125	100	150	225	300	275
d_3	мм	75	125	175	200	200	250

Окончание табл. 5.3.19

1	2	3	4	5	6	7	8
d_4	мм	100	100	150	250	225	225
l_1	м	30	35	42	44	47	51
l_2	м	59	64	71	80	87	95
l_3	м	25	31	38	56	39	71
l_4	м	100	108	110	114	117	120
l_5	м	50	40	35	40	30	20
α_1°	град	30	40	50	60	30	30
α_2°	град	120	130	140	150	120	130
α_3°	град	130	140	120	140	130	120
a/d	-	1/4	3/8	1/2	5/8	1/2	3/8
h	м	3	4	5	5,5	4,8	5,3
T	°C	20	15	14	13	17	15

Задача 5.3.19. Вода сливается из бака A в бак B по трубопроводу диаметром d и длиной $L = 2l$ (рис. 5.3.20). Из бака B вода вытекает в атмосферу через цилиндрический насадок диаметром d_1 (коэффициент расхода насадка $\mu = 0,82$). Коэффициенты сопротивления колена и вентиля в трубе $\zeta_k = 0,3$ и $\zeta_v = 4,0$; коэффициент сопротивления трения $\lambda = 0,03$. Определить, какой напор H нужно поддерживать в баке A , чтобы уровень в баке B находился на высоте h .

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.20.

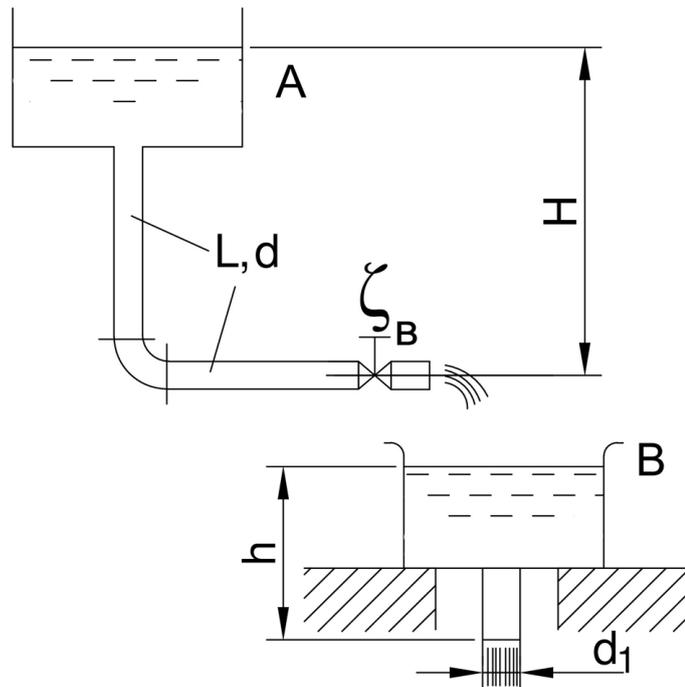


Рис. 5.3.20. К задаче 5.3.19

Таблица 5.3.20

№ варианта	d , мм	L , м	d_1 , мм	h , м
1	80	10	80	1,5
2	82	12	78	1,6
3	85	14	80	1,7
4	88	16	82	1,8
5	91	18	80	1,9
6	94	20	82	2,0

Задача 5.3.20. Поршень диаметром D движется равномерно вверх в цилиндре, засасывая воду из открытого резервуара с постоянным уровнем (рис. 5.3.21). Диаметр трубопровода – d ; длина каждого из его участков – L ; коэффициент сопротивления каждого из колен $\zeta_k = 0,5$; коэффициент сопротивления трения $\lambda = 0,03$. Когда поршень находится выше уровня в резервуаре на h , необходимая для его перемещения сила равна P .

Определить скорость подъема поршня и найти, до какой высоты h_{\max} его можно поднимать с такой скоростью без опасности отрыва от него жидкости, если давление насыщенных паров воды – $p_{н.п.}$, ее плотность – ρ , а атмосферное давление – $p_{ат.}$. Весом поршня, трением его о стенки и потерями напора в цилиндре можно пренебречь.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.21.

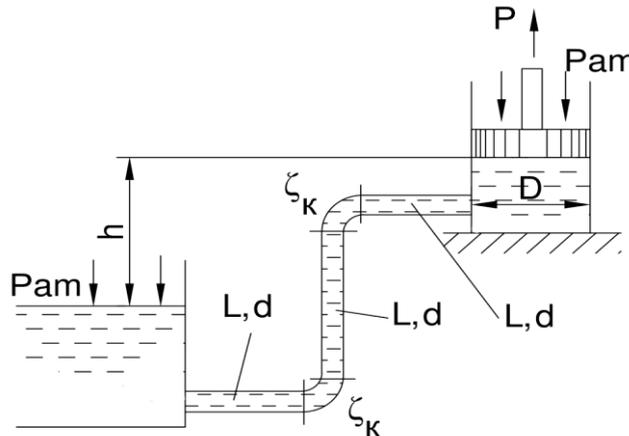


Рис. 5.3.21. К задаче 5.3.20

Таблица 5.3.21

№ варианта	D , мм	L , м	d , мм	h , м	P , кгс	$p_{н.п.}$, кгс/см ²	ρ , кг/м ³	$p_{ат.}$, мм рт. ст.
1	200	4	50	2,0	240	0,043	995,7	740
2	210	5	55	2,2	250	0,041	996,0	742
3	220	6	60	2,4	260	0,039	996,3	744
4	230	7	65	2,6	270	0,036	996,5	746
5	240	8	70	2,8	280	0,034	996,8	748
6	250	9	75	3,0	290	0,032	997,1	750

Задача 5.3.21. По сифонному трубопроводу, работающему под напором H , необходимо подавать расход воды Q при условии, чтобы вакуум в трубопроводе не превосходил h_{vac} . Опасная точка A (горло сифона, или точка наиболее глубокого вакуума) расположена выше начального уровня воды на h , длина восходящей линии трубопровода до этой точки равна l_1 , длина нисходящей линии – l_2 . Трубопровод снабжен приемной сеткой ($\zeta_c = 5$) и задвижкой (рис. 5.3.22).

Определить диаметр трубопровода d и коэффициент сопротивления задвижки $\zeta_{задв}$, удовлетворяющие условиям задачи.

Указание. Для гидравлического коэффициента трения воспользоваться формулой $\lambda = \frac{0,02}{d^{\frac{1}{2}}}$ (старые водопроводные трубы), потерями на поворотах пренебречь.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.22.

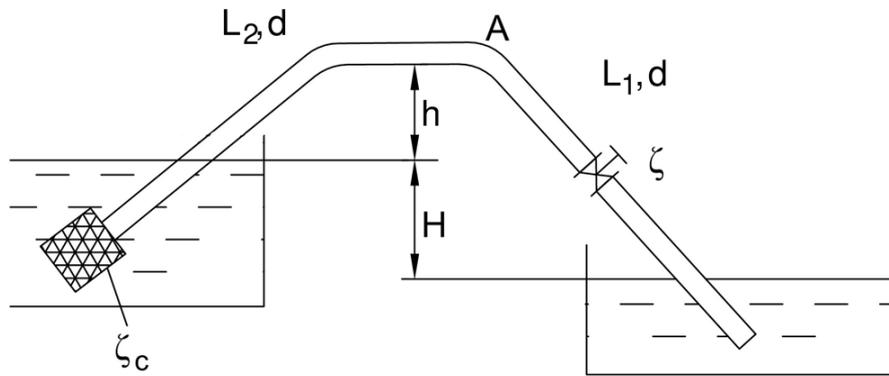


Рис. 5.3.22. К задаче 5.3.21

Таблица 5.3.22

№ варианта	H , м	Q , м ³ /с	h , м	l_1 , м	l_2 , м	h_{vac} , м
1	6,0	0,050	4,0	100	60	7,0
2	5,8	0,052	4,1	105	62	6,9
3	5,6	0,054	4,2	110	65	6,8
4	5,4	0,056	4,3	115	68	6,7
5	5,2	0,058	4,4	120	70	6,6
6	5,0	0,060	4,5	125	75	6,5

Задача 5.3.22. Определить максимальный расход, который можно подавать в бак (рис. 5.3.23), снабженный сифонной сливной трубой диаметром d и общей длиной L , если выходное сечение трубы ниже предельного уровня в баке на H_1 . Труба имеет два сварных колена ($\zeta_k = 1,3$) и вентиль ($\zeta_v = 6,9$). Коэффициент сопротивления трения $\lambda = 0,025$.

Определить вакуум в сечении A , если это сечение выше предельного уровня на h и длина участка трубы до него l .

Каков будет вакуум в этом сечении, когда уровень в баке понизится на H_2 ?

Указание. Из-за срыва потока у внутренней стенки возникает в сечении A сжатие потока (коэффициент сжатия $\varepsilon = 0,5$).

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.23.

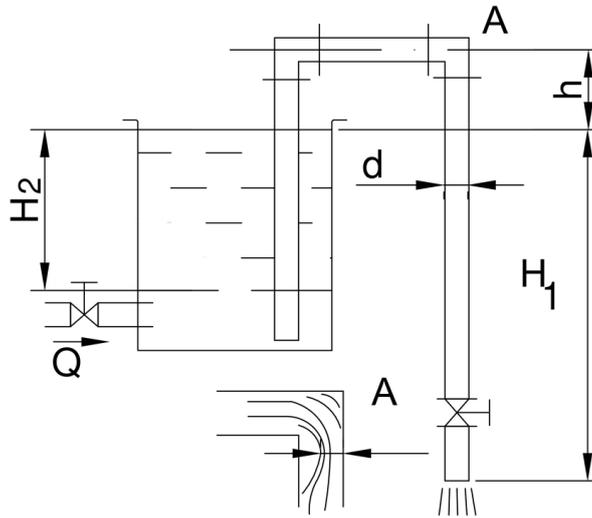


Рис. 5.3.23. К задаче 5.3.22

Таблица 5.3.23

№ варианта	H_1 , м	H_2 , м	d , мм	L , м	l , м	h , м
1	4,0	2,0	100	10,0	5,0	1,5
2	4,2	2,1	105	10,5	5,1	1,6
3	4,4	2,2	110	11,0	5,2	1,7
4	4,6	2,3	115	11,5	5,3	1,8
5	4,8	2,4	120	12,0	5,4	1,9
6	5,0	2,5	125	12,5	5,5	2,0

Задача 5.3.23. Вода вытекает из бака в атмосферу по вертикальной трубе высотой l и диаметром d (рис. 5.3.24). Установить зависимость давления в начальном сечении трубы A от уровня h , поддерживаемого в баке, и найти, при каком уровне h давление в этом сечении будет равно атмосферному.

Для двух значений уровня – H_1 и H_2 – построить график напоров по высоте трубы.

Сопротивлением входа в трубу пренебречь, коэффициент сопротивления трения в трубе λ принимать постоянным.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.24.

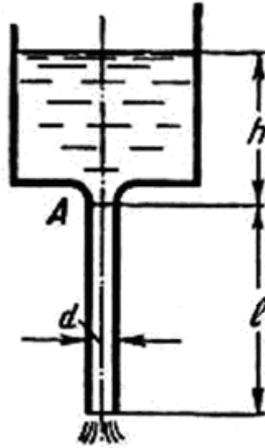


Рис. 5.3.24. К задаче 5.3.23

Таблица 5.3.24

№ варианта	h_1 , м	h_2 , м	d , мм	l , м	λ
1	0,5	2,0	40	2,0	0,040
2	0,6	2,1	45	2,1	0,042
3	0,7	2,2	50	2,2	0,044
4	0,8	2,3	55	2,3	0,046
5	0,9	2,4	60	2,4	0,048
6	1,0	2,5	65	2,5	0,050

Задача 5.3.24. Для вертикальной трубы диаметром d , по которой вода вытекает в атмосферу из бака с постоянным уровнем h , найти зависимость расхода от высоты трубы l и указать, при каком уровне h расход не будет изменяться с высотой трубы (рис. 5.3.25).

Сопротивлением входа в трубу пренебрегать, коэффициент сопротивления трения в трубе λ принимать постоянным.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.25.

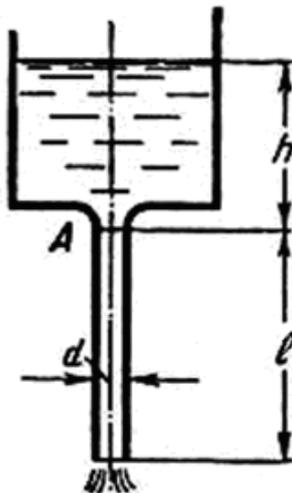


Рис. 5.3.25. К задаче 5.3.24

Таблица 5.3.25

№ варианта	h , м	d , мм	l , м	λ
1	0,5	40	2,0	0,030
2	0,6	45	2,1	0,042
3	0,7	50	2,2	0,044
4	0,8	55	2,3	0,046
5	0,9	60	2,4	0,048
6	1,0	65	2,5	0,050

Задача 5.3.25. Наполнение бассейна из магистрали (рис. 5.3.26) с заданным давлением M производится по горизонтальной трубе общей длиной l , снабженной вентилем ($\zeta_{вен} = 4$) и отводом ($\zeta_{отв} = 0,3$).

Определить диаметр трубы, который обеспечит наполнение бассейна объемом воды W за время t . Для коэффициента сопротивления трения воспользоваться формулой $\lambda = \frac{0,02}{d^{1/3}}$ (старые водопроводные трубы).

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.26.

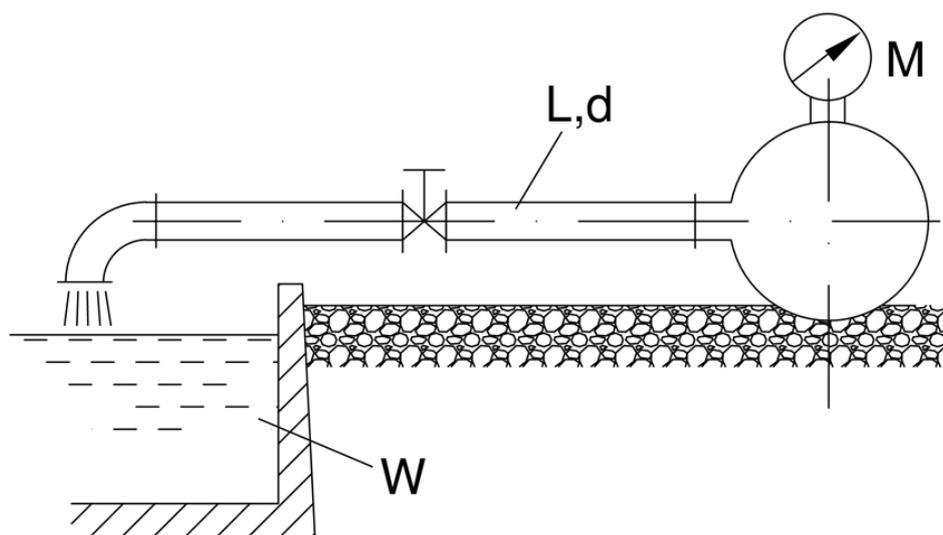


Рис. 5.3.26. К задаче 5.3.25

Таблица 5.3.26

№ варианта	M , ат	l , м	W , м ³	t , мин
1	2,5	45	36	30
2	2,6	50	38	32
3	2,7	55	40	34
4	2,8	60	42	36
5	2,9	65	44	38
6	3,0	70	46	40

Задача 5.3.26. Вода подается в открытый верхний бак по вертикальной трубе (диаметром d , длиной $2l$; заглубление концов трубы под уровни в баках – h) за счет избыточного давления M в нижнем замкнутом баке (рис. 5.3.27).

Определить давление M , при котором расход будет равен Q .

Коэффициент сопротивления полностью открытого вентиля $\zeta_{вен} = 9,3$. Коэффициент сопротивления трения определить по заданной шероховатости $\Delta_s = 0,2$ мм.

Построить график напоров по высоте трубы.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.27.

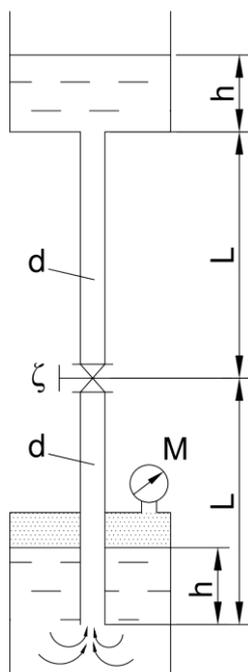


Рис. 5.3.27. К задаче 5.3.26

Таблица 5.3.27

№ варианта	d , мм	l , м	h , м	Q , м ³ /с
1	25	3,0	0,5	0,0015
2	30	3,5	0,6	0,0020
3	35	4,0	0,7	0,0025
4	40	4,5	0,8	0,0030
5	45	5,0	0,9	0,0035
6	50	5,5	1,0	0,0040

Задача 5.3.27. Какой предельной длины L можно сделать пожарный рукав диаметром D , если при давлении M (по манометру на гидранте) подача через спрыск (насадок), выходной диаметр которого – d , должна равняться Q ? Пожарный ствол поднят выше манометра на величину h , его

коэффициент сопротивления, отнесенный к скорости выхода из spryska, $\zeta_{\text{вых}} = 0,1$ (сжатие струи на выходе отсутствует) (рис. 5.3.28).

Задачу решить, предполагая использование непрорезиненных ($\lambda = 0,054$) и прорезиненных ($\lambda = 0,0245$) рукавов; учитывать только потери на трение.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.28.

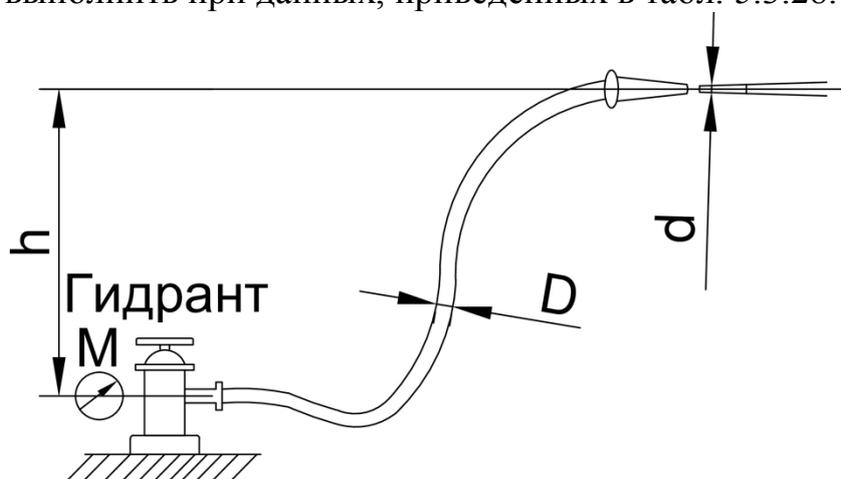


Рис. 5.3.28. К задаче 5.3.27

Таблица 5.3.28

№ варианта	M , ат	D , мм	d , мм	Q , м ³ /мин	h , м
1	8,0	65	30	1,2	10
2	8,1	66	31	1,3	11
3	8,2	67	32	1,4	12
4	8,3	68	33	1,6	13
5	8,4	69	34	1,6	14
6	8,5	70	35	1,7	15

Задача 5.3.28. По трубопроводу постоянного диаметра подается заданный расход жидкости. Определить, на сколько процентов необходимо увеличить диаметр трубопровода, чтобы уменьшить в нем потери напора на трение в два раза.

Задачу решить, предполагая, что имеют место: 1) ламинарный режим; 2) турбулентный режим в гидравлически гладкой трубе, $\lambda = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}$; 3) турбулентный режим в гидравлически шероховатой трубе, $\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}$.

Задача 5.3.29. Температура мазута, перекачиваемого по горизонтальному трубопроводу диаметром D и длиной L , меняется в связи с климатическими условиями от 10 до 30 градусов Цельсия.

Определить потерю давления в трубопроводе при постоянном расходе мазута Q при значениях температуры t , кинематических коэффициентов

вязкости ν и относительного веса мазута δ , заданных в табл. 5.3.29. Шероховатость стенок трубопровода $\Delta = 0,1$ мм.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.30.

Таблица 5.3.29

t , град	ν , м ² /с	δ
0	0,000030	0,900
20	0,000015	0,895
30	0,000005	0,870

Таблица 5.3.30

№	D , мм	L , км	Q , л/с
1	150	5,0	50
2	160	5,2	60
3	170	5,4	70
4	180	5,6	80
5	190	5,8	90
6	200	6,0	100

Задача 5.3.30. Купоросное масло при температуре 25 градусов Цельсия ($\mu = 20$ сантипуаз, $\delta = 1,84$) выжимается из бака (рис. 5.3.29) в атмосферу давлением воздуха M по трубе длиной L и поднимается на высоту h . Определить диаметр трубопровода, при котором объем масла W будет выжиматься из бака за время t , если шероховатость Δ , и местные потери составляют 25 % потерь на трение (изменением h в процессе выжимания масла пренебрегать).

Задачу решить графически, построив зависимость потребного напора H от диаметра d при заданном расходе.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 5.3.31.

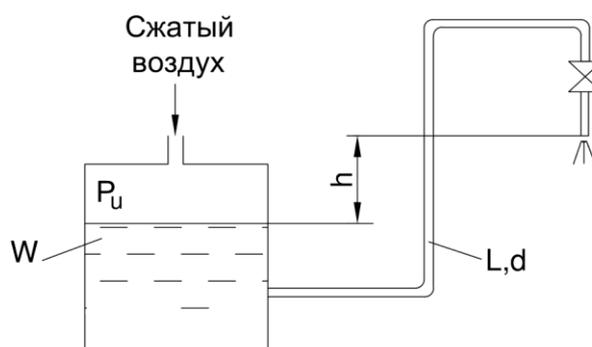


Рис. 5.3.29. К задаче 5.3.30

Таблица 5.3.31

№ варианта	M , ат	L , м	h , м	W , м ³	t , мин	Δ , мм
1	4,0	40	8,0	3,0	5	0,5
2	4,1	45	8,1	3,2	6	0,6
3	4,2	50	8,2	3,4	7	0,7
4	4,3	55	8,3	3,6	8	0,8
5	4,4	60	8,4	3,8	9	0,9
6	4,5	65	8,5	4,0	10	1,0

6. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДЛИННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

6.1. Основные расчетные зависимости и типы задач

Длинными называют трубопроводы, в которых потери напора в местных сопротивлениях малы (по сравнению с потерями напора на трение по длине) и ими в расчетах можно пренебречь.

Средняя скорость движения жидкости в длинных трубопроводах обычно не превышает 3 м/с (из экономических соображений), поэтому скоростными напорами при расчетах пренебрегают (ввиду их малости по сравнению с полными напорами). В связи с этим при расчетах длинных трубопроводов гидростатический напор считают равным полному. Благодаря этому допущению на продольном профиле длинного трубопровода строят только пьезометрическую линию, считая ее одновременно линией полного напора.

Примерами длинных трубопроводов являются нагнетательные трубопроводы насосных станций и магистральные водопроводы.

Длинные трубопроводы, так же, как и короткие, рассчитывают по уравнению Д. Бернулли (см. формулу (4.4)), которое с учетом отмеченных выше допущений принимает вид формулы Дарси – Вейсбаха (см. формулу (4.11)):

$$H = h_l = \lambda \frac{lv^2}{d2g}, \quad (6.1)$$

где h_l – потери напора по длине, м; l – длина рассматриваемого участка трубопровода, м; v – средняя скорость движения жидкости, м/с; d – внутренний диаметр труб на участке, м.

Этот вид формулы наглядно показан на рис. 6.1.1.

Гидравлический расчет длинных трубопроводов выполняют, полагая их работу в области квадратичного сопротивления. Это существенно упрощает расчет, так как при квадратичной области сопротивления коэффициент гидравлического трения λ зависит только от относительной шероховатости $\Delta_{\text{э}} / d$. Для этой области сопротивления уравнение (6.1) легко преобразуется в любую из следующих идентичных расчетных зависимостей:

$$h_l = (Q^2 / K^2) \cdot l = Jl; \quad (6.2)$$

$$h_l = A l Q^2; \quad (6.3)$$

$$h_l = S Q^2, \quad (6.4)$$

где Q – расход жидкости, м³/с; J – гидравлический уклон на участке трубопровода; K – модуль расхода (расходная характеристика) трубопровода, м³/с; A – удельные сопротивления трубопровода, с²/м⁶.

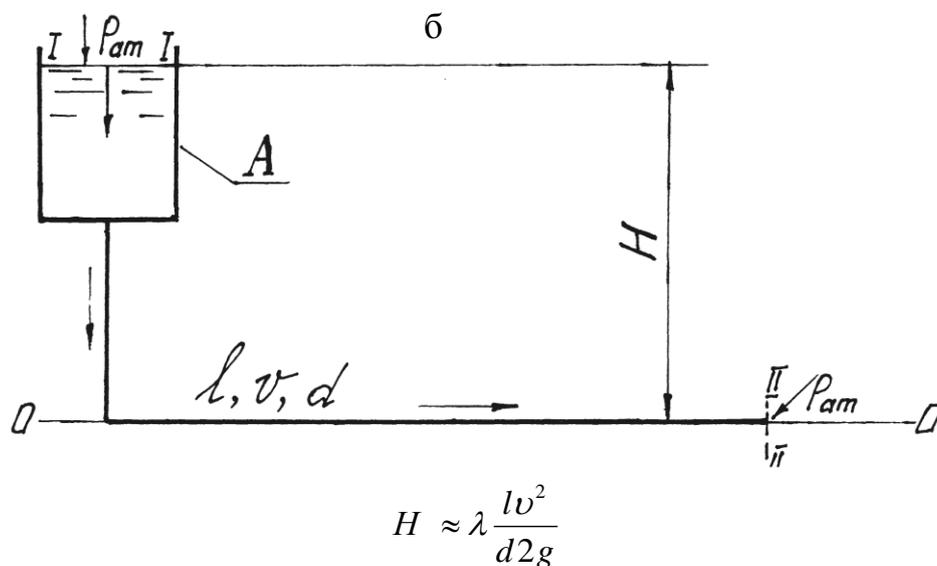
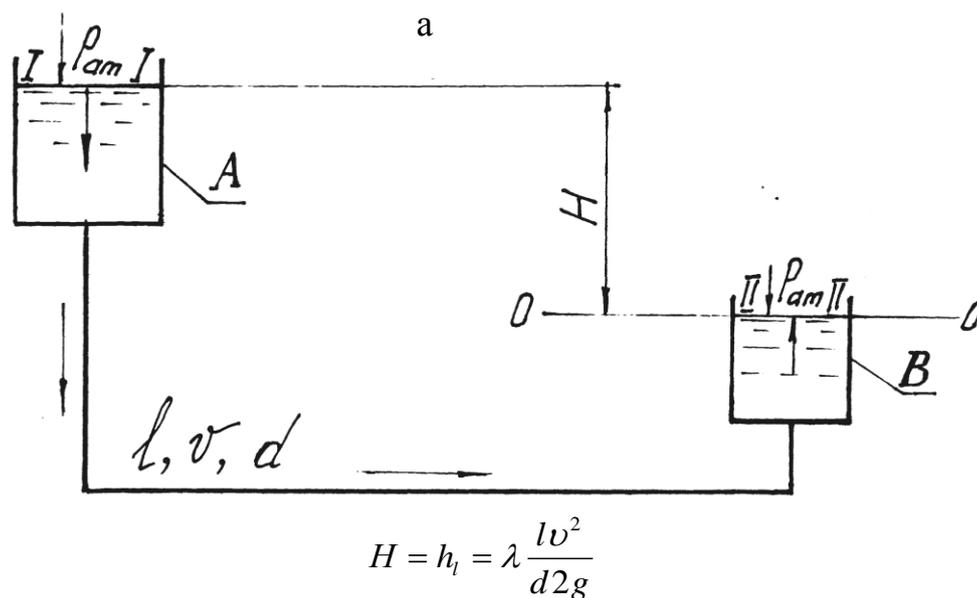


Рис. 6.1.1. К гидравлическому расчету простого длинного трубопровода: а – истечение из резервуара *A* в резервуар *B* (под уровень); б – в атмосферу

$$K = \frac{Q}{\sqrt{J}}; \quad K = \frac{1}{\sqrt{A}}, \quad (6.5)$$

где A – удельные сопротивления трубопровода, $\text{с}^2/\text{м}^6$.

Удельные сопротивления трубопровода устанавливаются по формуле

$$A = 1 / K^2. \quad (6.6)$$

Сопротивление трубопровода S , $\text{с}^2/\text{м}^5$, определяют по формуле

$$S = Al = l / K^2. \quad (6.7)$$

В учебном пособии (из-за ограниченности его объема) при расчетах использованы зависимости (6.2) и (6.3).

Величины K , A и S представляют собой обобщенные гидравлические параметры трубопровода, использование которых значительно упрощает и ускоряет гидравлический расчет.

При квадратичной области сопротивления параметры $K_{кв}$ и $A_{кв}$ зависят только от диаметра d (при заданной величине Δz), $S_{кв}$ – от диаметра d и длины l трубопровода, поэтому для удобства расчетов числовые значения $K_{кв}$, $A_{кв}$ и $S_{кв}$ заранее вычислены для каждого стандартного диаметра d труб из различных материалов и сведены в таблицы, помещенные в справочную и учебную литературу [3, 7, 8, 12]. В частности, в прилож. 7 приведены значения $K_{кв}$ для стальных и чугунных труб (новых и бывших в эксплуатации). Если в ходе расчета выясняется, что трубопровод работает не в квадратичной области гидравлического сопротивления, в величины $K_{кв}$, $A_{кв}$ и $S_{кв}$ вводится поправка на неквадратичность (коэффициенты Θ_1 и Θ_2), например:

$$K = K_{кв} \cdot \Theta_1; A = A_{кв} \cdot \Theta_2,$$

где $\Theta_2 = 1 / \Theta_1^2$.

Заметим, что при квадратичной области сопротивления $\Theta_1 = \Theta_2 = 1$.

Значения коэффициентов Θ_1 для стальных и чугунных труб приведены в прилож. 8.

При гидравлических расчетах граница между доквадратичной и квадратичной областями сопротивления определяется по величине средней скорости v потока в трубе. В прилож. 9 дана таблица (для стальных и чугунных труб), в которой приведены значения предельных средних скоростей $v_{пред}$, при превышении которых трубопровод начинает работать в области квадратичного сопротивления.

При расчете простого длинного трубопровода, т. е. трубопровода постоянного диаметра без ответвлений, имеют место три типа задач.

Задача I типа. Определение расхода воды Q в трубопроводе при заданных длине l , материале труб, диаметре d и потерях напора h_1 .

Для решения задачи используют формулу (6.2), записав ее в виде

$$Q = K \sqrt{h_1 / l}. \quad (6.8)$$

Затем, обратившись к таблице значений модуля расхода $K_{кв}$ (см. прилож. 7), находят в ней величину, отвечающую заданному стандартному диаметру d . Далее по формуле (6.8) вычисляют расход Q в первом приближении, а через него – среднюю скорость $v = Q / \omega$. Зная величину v , в таблице поправок на неквадратичность Θ_1 (см. прилож. 8), уточняют расход Q , введя в формулу (6.8) коэффициент Θ_1 :

$$Q_{ум} = \Theta_1 K_{кв} \sqrt{h_1 / l}. \quad (6.9)$$

Задача II типа. Определение потерь напора h_1 при заданных расходе Q , материале труб, длине l и диаметре d трубопровода.

Для решения этой задачи используют формулу (6.2), предварительно вычислив среднюю скорость v и выяснив необходимость введения поправки на неквадратичность.

$$h_l = \frac{Q^2}{\Theta_1^2 K_{кв}^2} l. \quad (6.10)$$

Значения Θ_1 и $K_{кв}$ берут из прилож. 7, 8.

Задача III типа. Определение стандартного диаметра d трубопровода при заданных расходе жидкости Q , потерях напора h_l , материале труб и длине трубопровода l .

Для решения этой задачи применяют зависимость (6.2), записав ее для удобства в виде

$$K = Q \cdot \sqrt{l/h_l}. \quad (6.11)$$

Подставив в формулу (6.11) числовые значения заданных величин, вычисляют модуль расхода K . Затем в прилож. 7 для величины $K_{кв} > K$ находят стандартный диаметр d трубопровода. Имея заданный расход Q и найденный диаметр d , вычисляют скорость v в трубопроводе, чтобы через нее по таблице значений Θ_1 (см. прилож. 8) выяснить необходимость уточнения вычисленного модуля расхода по формуле

$$K_{ум} = (Q/\Theta_1) \cdot \sqrt{l/h_l} \quad (6.12)$$

для окончательного выбора диаметра d , воспользовавшись прилож. 7.

При последовательно соединенных участках длинного трубопровода с различными диаметрами (рис. 6.1.2) каждый его участок рассматривается как отдельный простой трубопровод постоянного диаметра, потери напора в котором вычисляют по формуле (6.2).

Суммарные потери напора в системе последовательно соединенных участков (рис. 6.1.2) находят по формуле

$$H = \sum_{i=1}^{i=n} h_l = \frac{Q^2}{K_1^2} l_1 + \frac{Q^2}{K_2^2} l_2 + \dots + \frac{Q^2}{K_n^2} l_n = Q^2 \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{K_i^2} l_i. \quad (6.13)$$

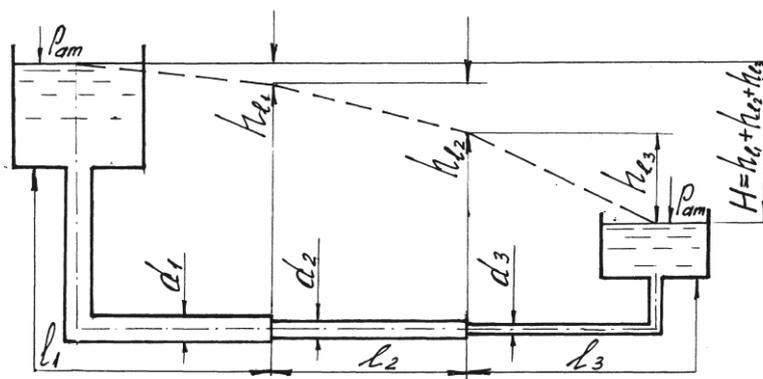


Рис. 6.1.2. Схема простого длинного трубопровода с последовательно соединенными участками разного диаметра

При параллельно соединенных участках длинного трубопровода (рис. 6.1.3) расход Q_i в каждом из них вычисляют по формуле (6.8).

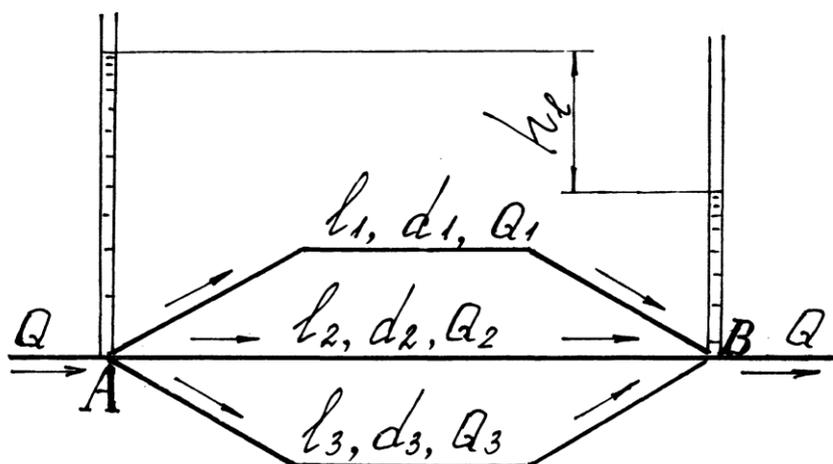


Рис. 6.1.3. Схема сложного длинного трубопровода с параллельно соединенными участками

Суммарный расход Q на участках

$$Q = K_1 \sqrt{\frac{h_l}{l_1}} + K_2 \sqrt{\frac{h_l}{l_2}} + K_3 \sqrt{\frac{h_l}{l_3}}, \quad (6.14)$$

где h_l — потеря напора на участке, вычисляемая по формуле, полученной в результате решения уравнения (6.14):

$$h_l = \frac{Q^2}{\left(\sum \frac{K_i}{\sqrt{l_i}} \right)^2}. \quad (6.15)$$

Основной задачей расчета длинного трубопровода с параллельно соединенными участками является определение потерь напора h_l и расходов Q на каждом участке. Эту задачу решают следующим образом: имея, например, $K_1, K_2, K_3, l_1, l_2, l_3$ и Q (см. рис. 6.1.3), вычисляют по формуле (6.15) величину h_l , а по формуле (6.8) — расходы Q_1, Q_2, Q_3 на участках.

При расчете длинных трубопроводов для правильной оценки потерь напора h_l на участках необходимо учитывать характер раздачи транспортируемых по участкам расходов воды.

Если на рассматриваемом участке расход Q является величиной постоянной, а его отбор происходит в концевой точке участка, то расход называют транзитным $Q_{тр}$. В этом случае в формулу для потерь напора подставляется $Q = Q_{тр} = const$. Если же на участке происходит только непрерывная равномерная по длине l раздача расхода $Q_{н.р}$, в формулу для потерь напора h_l вместо расхода Q подставляют расчетный расход Q_p , вычисляемый по формуле

$$Q_p = Q_{н.р.} / \sqrt{3} \approx 0,58 Q_{н.р.} \approx 0,58 q l, \quad (6.16)$$

где $Q_{н.р.} = q l$ – непрерывно и равномерно раздаваемый расход воды, м³/с; q – интенсивность раздачи расхода воды (расход, раздаваемый с 1 пог. м трубопровода).

Если же на участке трубопровода часть расхода воды раздается равномерно по длине l , а другая часть отбирается в конце участка, т. е. протекает транзитом, в формулу для h_l вместо Q подставляют расчетный расход Q_p , вычисляемый по формуле

$$Q_p = Q_{тр} + 0,55 Q_{н.р.} \quad (6.17)$$

6.2. Примеры решения задач

Задача 6.2.1. Из напорного бака A в пункт B (рис. 6.2.1) по стальному длинному трубопроводу диаметром $d = 0,25$ м и длиной $l = 180$ м подается вода. Отметка уровня воды (полный напор – H_A) в баке A $\nabla_A = 12,0$ м, а отметка пьезометрической линии (гидростатический напор) в пункте B $\nabla_B = 7,2$ м.

Определить расход воды Q и среднюю скорость v в трубопроводе для случаев:

- трубы нормальные после нескольких лет эксплуатации;
- трубы новые.

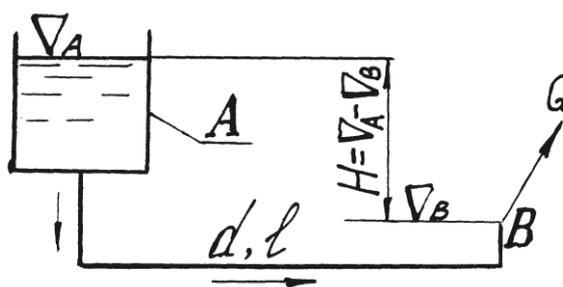


Рис. 6.2.1. К задаче 6.2.1

Решение:

а) величину расхода Q вычисляем по формуле (6.8). Величины $H = h = \nabla_A - \nabla_B$ и l , входящие в эту формулу, заданы, а величину модуля расхода K для стальных нормальных труб находим в прилож. 7 ($K_{кв} = 0,616$ м³/с).

Подставив в формулу (6.8) числовые значения величин, получим:

$$Q = K_{кв} \sqrt{H/l} = 0,616 \sqrt{(12,0 - 7,2)/180} = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Среднюю скорость v вычисляем по формуле

$$v = Q / \omega = 4Q / \pi d^2 = (4 \cdot 0,100) / (3,14 \cdot 0,250^2) = 2,04 \text{ м/с}.$$

Зная величину ν , обратимся к таблице поправок на неквадратичность Θ_1 (см. прилож. 8), чтобы выяснить необходимость уточнения найденного расхода Q из-за работы трубопровода в неквадратичной области гидравлического сопротивления, и убеждаемся, что при $\nu = 2,04$ м/с коэффициент $\Theta_1 = 1$, следовательно, трубопровод работает в области квадратичного сопротивления и нет необходимости уточнять расход Q ;

б) для новых стальных труб $d = 0,250$ м, $K = 0,716$ м³/с (см. прилож. 7).

$$Q = 0,716 \sqrt{(12,0 - 7,2) / 180} = 0,117 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\nu = (4 \cdot 0,117) / (3,14 \cdot 0,25^2) = 2,38 \text{ м/с}.$$

В таблице поправок на неквадратичность (см. прилож. 8) находим, что при $\nu = 2,38$ м/с, $\Theta_1 = 0,99$, т. е. трубопровод работает в области неквадратичного сопротивления. Следовательно, необходимо уточнить вычисленные значения расхода Q и скорости ν :

$$Q_{\text{ум}} = 0,119 \cdot 0,99 = 0,116 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\nu_{\text{ум}} = 2,38 \cdot 0,99 = 2,36 \text{ м/с}.$$

Задача 6.2.2. Насос подает воду по горизонтальному трубопроводу (рис. 6.2.2), состоящему из трех последовательно соединенных участков: $AB = 100$ м, $BC = 28$ м, $CD = 50$ м. При этом на участке BC происходит равномерная непрерывная раздача расхода воды $Q_{BCн.р} = 0,008$ м³/с, а по участку CD транзитом проходит расход воды $Q_{CDт.р} = 0,003$ м³/с, вытекающей в атмосферу. Трубы стальные нормальные.

Определить диаметры d_{AB} , d_{BC} , d_{CD} труб и потери напоров h_{IAB} , h_{IBC} , h_{ICD} на участках трубопровода.

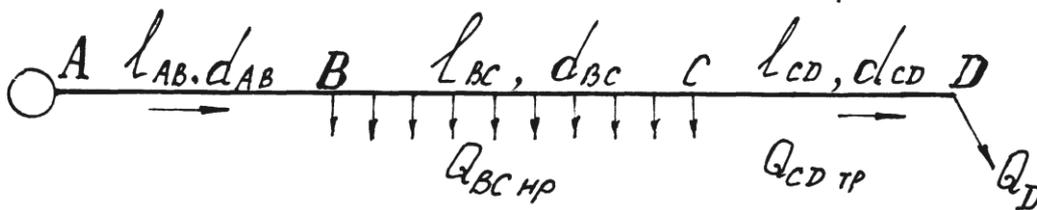


Рис. 6.2.2. К задаче 6.2.2

Решение. Диаметры труб на участках найдем по расходам воды на них с помощью таблицы рекомендуемых предельных (с экономической точки зрения) скоростей и расходов (см. прилож. 10). На CD $Q_{CDт.р} = 0,003$ л/с, $d_{CD} = 0,075$ м. Фактический расход воды на участке BC – величина переменная, поэтому предварительно вычислим расчетный расход по формуле (6.17):

$$Q_{BCр} = Q_{CDт.р} + 0,55 Q_{BCн.р} = 0,003 + 0,55 \cdot 0,008 = 0,0074 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для найденного расхода в соответствии с прилож. 10 $d_{BC} = 0,125$ м.

Участок АВ: $Q_{ABp} = Q_{BCн.р} + Q_{CDт.р} = 0,008 + 0,003 = 0,011$ м³/с;
 $d_{AB} = 0,150$ м.

Потери напора по длине на участках трубопровода определим через удельное сопротивление A по формуле (6.3), предварительно вычислив среднюю скорость $v = Q/\omega$ на каждом участке, выяснив с помощью прилож. 9 область гидравлического сопротивления для каждого участка и введя при необходимости в величину $A_{кв}$ поправку Θ_2 :

$$v_{CD} = (4 \cdot 0,0030) / (3,14 \cdot 0,075^2) = 0,68 \text{ м/с};$$

$$v_{BC} = (4 \cdot 0,0074) / (3,14 \cdot 0,125^2) = 0,60 \text{ м/с};$$

$$v_{AB} = (4 \cdot 0,0110) / (3,14 \cdot 0,150^2) = 0,62 \text{ м/с}.$$

Как видим, все участки трубопровода работают не в области квадратичного сопротивления, поэтому

$$A_{CD} = \Theta_2 \cdot A_{CDкв} = 1,04 \cdot 1010 = 1054 \text{ с}^2/\text{м}^6;$$

$$A_{BC} = \Theta_2 \cdot A_{BCкв} = 1,06 \cdot 85,2 = 90,3 \text{ с}^2/\text{м}^6;$$

$$A_{AB} = \Theta_2 \cdot A_{ABкв} = 1,06 \cdot 34,2 = 36,25 \text{ с}^2/\text{м}^6.$$

Подставив в формулу (6.3) соответствующие числовые значения величин, вычислим потери напора h_l по длине для каждого участка:

$$h_{lCC} = A_{CD} Q_{CDт.р}^2 l_{CD} = 1054 \cdot 0,003^2 \cdot 50 = 0,47 \text{ м};$$

$$h_{lBB} = A_{BC} Q_{BCн.р}^2 l_{BC} = 90,3 \cdot 0,0074^2 \cdot 28 = 0,14 \text{ м};$$

$$h_{lAA} = A_{AB} Q_{ABн.р}^2 l_{AB} = 36,25 \cdot 0,011^2 \cdot 100 = 0,44 \text{ м}.$$

Задача 6.2.3. Из напорного бака A в узел B (рис. 6.2.3) проложен трубопровод, состоящий из двух параллельно соединенных участков. При этом на втором участке осуществляется равномерная непрерывная раздача расхода воды $Q_{н.р} = 0,023$ м³/с. В узел B поступает транзитный расход $Q_{Вт.р}$. Отметки уровня воды в баке A и в узле B $V_A = 21,2$ м, $V_B = 14,5$ м соответственно. Трубы чугунные нормальные.

Определить расход $Q_{Вт.р}$ в узле B и отметку уровня воды V_A (полный напор) в напорном баке, обеспечивающую увеличение расхода $Q_{Вт.р}$ в 2 раза (при неизменных значениях $Q_{н.р}$ и Q_B).

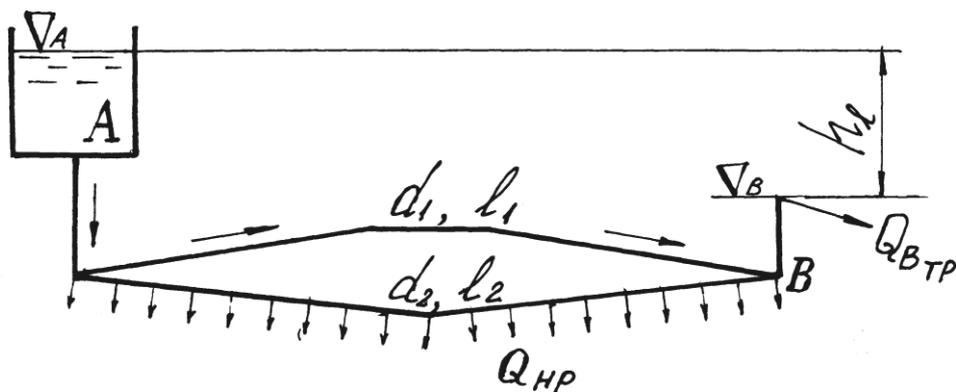


Рис. 6.2.3. К задаче 6.2.3

Решение. Расход воды Q_B в узле B найдем исходя из того, что величина его складывается из двух частей Q_1 и Q_2 , проходящих по участкам 1 и 2, т. е. $Q_B = Q_1 + Q_2$. Величину расхода Q_1 , проходящего по участку 1, определим по формуле (6.8):

$$Q_{mp1} = K_1 \sqrt{\frac{H}{l_1}} = K \sqrt{\frac{\nabla_A + \nabla_B}{l_1}} = 0,159 \sqrt{\frac{6,7}{620}} = 0,0165 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Величину расхода $Q_2 = Q_{н.р.}$, проходящего по участку 2, найдем из формулы (6.2), записанной в виде

$$H = h_l = (Q_{mp}^2 + 2Q_{mp}Q_{н.р.} + Q_{н.р.}^2 / 3) \cdot l_2 / K_2^2. \quad (6.18)$$

Выражение (6.18) представим в виде

$$Q_{mp}^2 + 2Q_{mp} \cdot Q_{н.р.} = H \cdot K_2^2 / l_2 - Q_{н.р.}^2 / 3.$$

Подставив в это выражение числовые значения величин, получим:

$$Q_{m.p}^2 + 2Q_{mp} \cdot 0,023 = 6,7 \cdot 0,34^2 / 700 - 0,023^2 / 3 = 0,00093 \text{ м}^6/\text{с}^2.$$

Решив это приведенное квадратное уравнение, найдем расход:

$$Q = Q_2 = 0,0211 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Таким образом, расход воды в узле B

$$Q_B = Q_1 + Q_2 = 0,0165 + 0,0211 = 0,0376 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Увеличив найденный расход вдвое, т. е. приняв $Q = 2Q_B = 2 \cdot 0,0376 = 0,0752 \text{ м}^3/\text{с}$, определим напор H , при котором в узле B будет обеспечен этот расход.

Величину H вычислим по формуле (6.2), полагая расход Q в этой формуле равным расходу Q_1 на первом участке трубопровода:

$$Q = Q_1 = Q_B - Q_{m.p.}$$

Здесь Q_{mp} часть расхода Q_B , проходящая транзитом по второму участку трубопровода.

Величину Q_{mp} найдем из равенства потерь напора на параллельно соединенных участках трубопровода:

$$\left(Q_{mp}^2 + 2Q_{mp}Q_{н.р.} + \frac{Q_{н.р.}^2}{3} \right) \frac{l_2}{K_2^2} = (Q_B - Q_{mp})^2 \frac{l_1}{K_1^2},$$

или

$$\left(Q_{mp}^2 + 2Q_{mp}Q_{н.р.} + \frac{Q_{н.р.}^2}{3} \right) \frac{l_2 K_1^2}{K_2^2 l_1} - Q_B^2 = 2Q_B Q_{mp} + Q_{mp}^2.$$

После подстановки числовых значений получим:

$$\left(Q_{mp}^2 + 0,023Q_{mp} + 0,023^2 / 3 \right) \frac{700 \cdot 0,159^2}{0,34 \cdot 620} = 0,0752^2 - 2 \cdot 0,0752 \cdot Q_{mp} + Q_{mp}^2.$$

Решив это уравнение, найдем, что $Q_{mp} = 0,0312 \text{ м}^3/\text{с}$. Следовательно, $Q_1 = 0,0752 - 0,0312 = 0,0440 \text{ м}^3/\text{с}$.

Потери напора будут:

$$H = Q_1^2 / K_1^2 \cdot l_1 = 0,044^2 / 0,159^2 \cdot 620 = 47,48 \text{ м}.$$

Отметка уровня воды в напорном баке должна быть:

$$H_A = V_B + H = 14,50 + 47,48 = 61,98 \text{ м.}$$

Задача 6.2.4. Из напорного бака, расположенного в узле A (рис. 6.2.4), по длинному трубопроводу подается вода в узел D . Напор в узле A $H_A = 11,0$ м, в узле D — $H_D = 3,5$ м.

Определить расход воды Q_D в узле D , если:

- 1) участки трубопровода соединены последовательно;
- 2) параллельно.

Длины участков и диаметры труб: $l_1 = 110$ м, $d_1 = 0,20$ м; $l_2 = 60$ м, $d_2 = 0,15$ м; $l_3 = 90$ м, $d_3 = 0,10$ м. Трубы стальные нормальные.

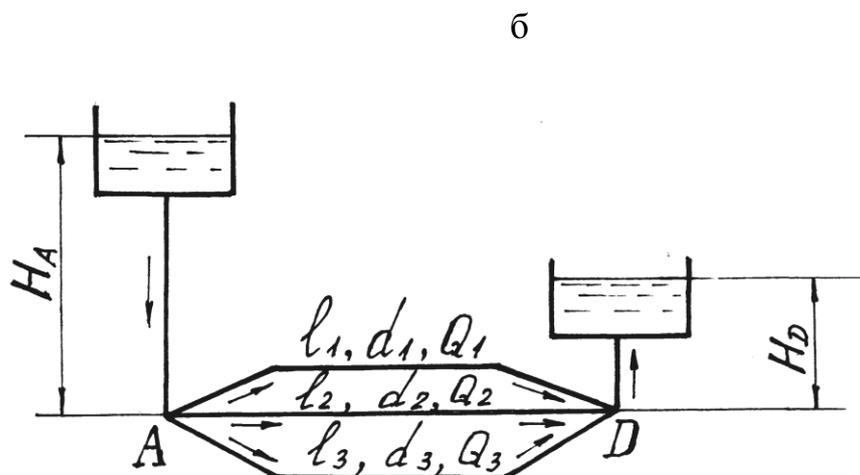
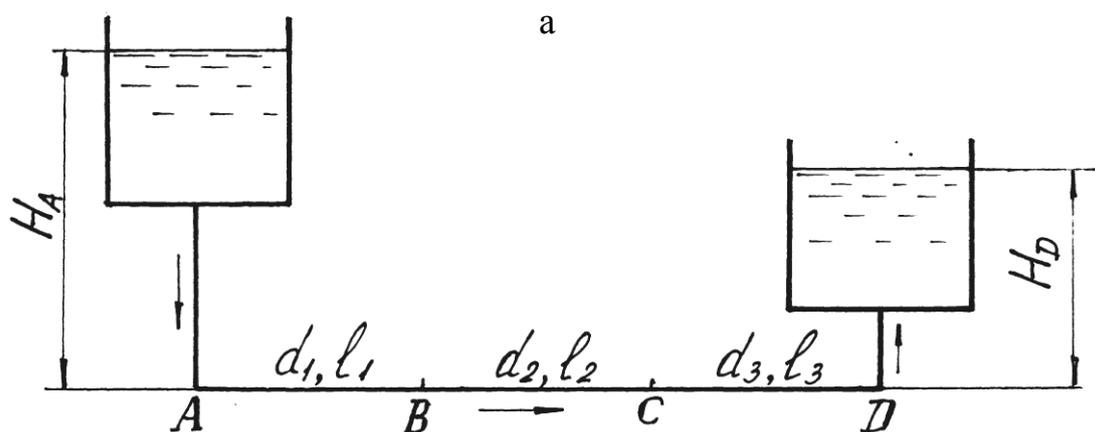


Рис. 6.2.4. К задаче 6.2.4:

а — участки трубопровода соединены последовательно; б — параллельно

Решение:

1) при **последовательном соединении** участков расход Q_D вычислим по формуле (6.13). Поскольку в узлах B и C отбора расхода нет, на всех участках расход воды одинаков и равен Q_D .

Напор H , входящий в формулу (6.2), равен разности напоров H_A и H_D :

$$H = 11,0 - 3,5 = 7,5 \text{ м.}$$

Величины модулей расхода K_i , входящие в формулу (6.13), найдем из прилож. 7, так как знаем диаметры и материал труб.

Подставив в формулу (6.13) числовые значения величин, установим расход воды Q_D :

$$Q_D = \sqrt{\frac{H}{\sum \frac{l_i}{K_i^2}}} = \sqrt{\frac{7,5}{\frac{110}{0,379^2} + \frac{60}{0,180^2} + \frac{90}{0,076^2}}} = \sqrt{\frac{7,5}{765,8 + 1851,9 + 15582}} = 0,0203 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Чтобы выяснить для каждого участка трубопровода область гидравлического сопротивления, вычислим средние скорости на участках и сравним их с предельными, указанными в прилож. 9:

$$v_1 = Q_D / \omega_1 = 0,0203 / 0,034 = 0,60 \text{ м/с;}$$

$$v_2 = Q_D / \omega_2 = 0,0203 / 0,0196 = 1,04 \text{ м/с;}$$

$$v_3 = Q_D / \omega_3 = 0,0203 / 0,0102 = 1,99 \text{ м/с.}$$

Первый участок будет работать в неквадратичной области сопротивления, поэтому для него в прилож. 8 находим поправку на неквадратичность: $\Theta_2 = 1 / \Theta_1^2 = 1,06$. Второй и третий участки будут работать в области квадратичного сопротивления, поэтому для них величина $\Theta_2 = 1,00$.

С учетом поправки

$$Q = \sqrt{\frac{7,5}{1,06 \cdot 765,8 + 1851,9 + 15582}} = 0,02027 \text{ м}^3/\text{с} \approx 0,0203 \text{ м}^3/\text{с},$$

т. е. расход Q практически не изменился;

2) при **параллельном соединении** участков трубопровода расход воды Q_D в узле D найдем как сумму расходов на участках, воспользовавшись формулой (6.14). Входящие в нее величины K_i уже установлены, а H и l_i заданы. Подставив числовые значения в формулу (6.14), получим:

$$Q = 0,379\sqrt{7,5/110} + 0,180\sqrt{7,5/60} + 0,076\sqrt{7,5/90} = \\ = 0,0990 + 0,0636 + 0,0219 = 0,1845 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Все участки трубопровода работают в области квадратичного сопротивления.

6.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 6.3.1. По горизонтальному трубопроводу AB (рис. 6.3.1) длиной l требуется пропускать транзитом расход воды Q . Гидростатический напор в точке B водопотребления – H_{BM} .

Подобрать стандартный диаметр d трубопровода и определить напор H_A в его начале.

Указание. Для решения задачи необходимо воспользоваться таблицами для гидравлического расчета водопроводных труб [15].

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 6.3.1.

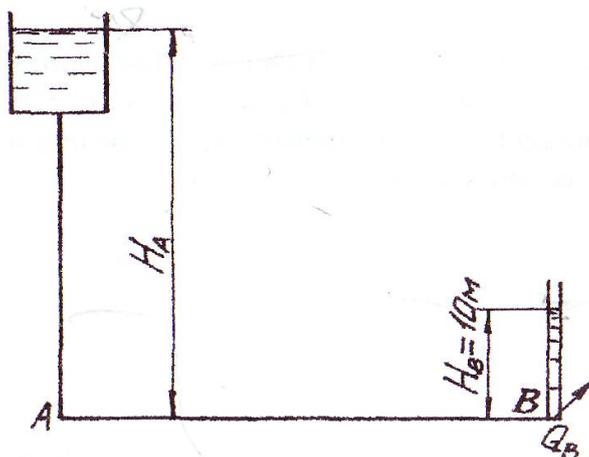


Рис. 6.3.1. Расчетная схема к задаче 6.3.1

Таблица 6.3.1

№ варианта	Материал труб	Q , л/с	H_B , м	L , м
1	Стальные новые	15	10	100
2	Чугунные нормальные	23	14	230
3	Новые асбестоцементные	45	18	290
4	Полиэтиленовые	12	22	240
5	Стальные новые	29	26	400
6	Чугунные нормальные	34	30	150

Задача 6.3.2. По трубопроводу, состоящему из трех последовательно соединенных участков AB , BC и CD (рис. 6.3.2), из водонапорной башни подается вода. При этом на участке BC расход воды раздается непрерывно и равномерно с интенсивностью q на 1 пог. м, а в узлах C и D – транзитные расходы Q_C и Q_D . Допускаемый свободный напор – $H_{св доп}$. Длины участков и отметки поверхности земли указаны на рис. 6.3.2.

Построить пьезометрическую линию и определить необходимую высоту водонапорной башни H_6 .

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 6.3.2.

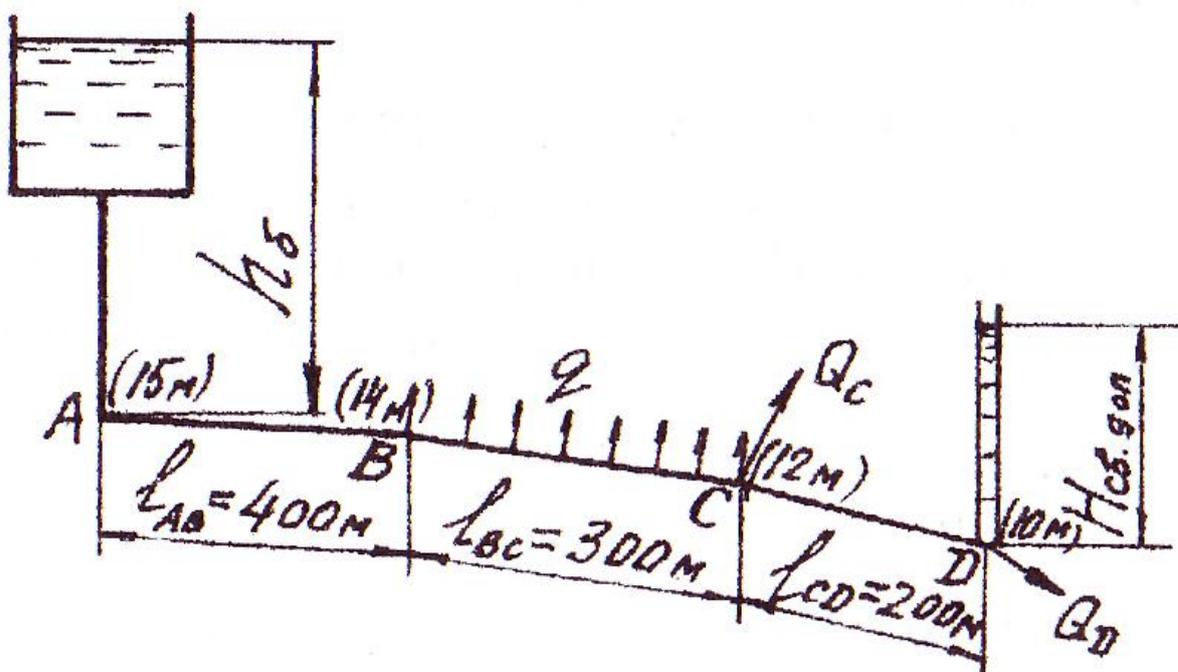


Рис. 6.3.2. Расчетная схема к задаче 6.3.2

Таблица 6.3.2

№ варианта	Материал труб	d_{AB} , м	d_{BC} , м	d_{CD} , м	q , л/с	Q_C , л/с	Q_D , л/с	$H_{св}$, м
1	Асбестоцементные новые	0,200	0,200	0,125	0,015	2	1,5	30
2	Стальные нормальные	0,225	0,2	0,175	0,025	3	2	26
3	Чугунные нормальные	0,200	0,200	0,15	0,005	1	2,4	22
4	Полиэтиленовые	0,175	0,175	0,125	0,035	2	1,3	18
5	Асбестоцементные новые	0,200	0,200	0,175	0,010	3	2,1	16
6	Стальные нормальные	0,225	0,2	0,15	0,02	2,5	1,8	14

Задача 6.3.3. Для горизонтального трубопровода (трубы стальные нормальные), схема которого представлена на рис. 6.3.3, определить необходимый напор H_A в узле A и расходы Q_1 , Q_2 , Q_3 в параллельно соединенных участках 1, 2 и 3.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 6.3.3.

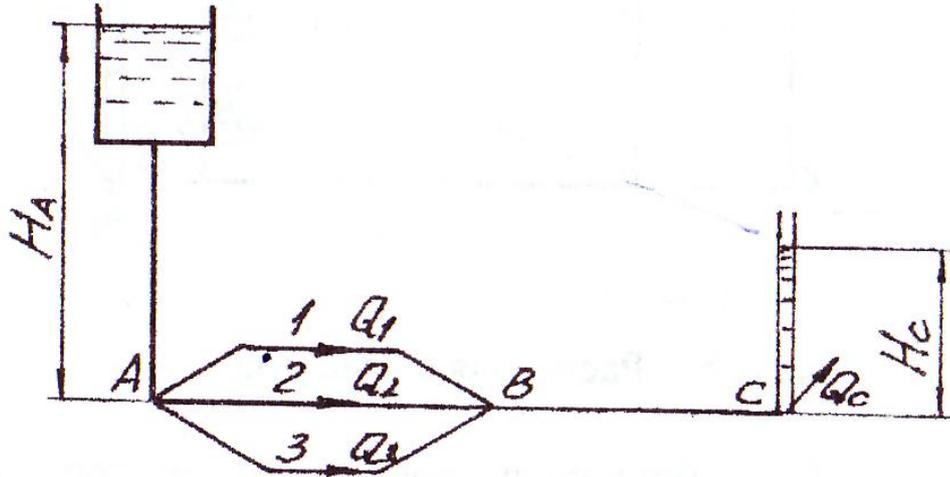


Рис. 6.3.3. Расчетная схема к задачам 6.3.3 и 6.3.4

Таблица 6.3.3

№ варианта	$Q_c, \text{ м}^3/\text{с}$	$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$l_3, \text{ м}$	$l_{BC}, \text{ м}$	$d_1, \text{ м}$	$d_2, \text{ м}$	$d_3, \text{ м}$	$d_{BC}, \text{ м}$	$H_c, \text{ м}$
1	0,080	300	200	250	400	0,250	0,200	0,200	0,350	10,0
2	0,100	400		300	350	0,250	0,250	0,250	0,300	15,0
3	0,090	350	250			0,250	0,200	0,150	0,350	5,0
4	0,08	400	200	300	350	0,300	0,250	0,250	0,300	14
5	0,12	300		250	400	0,250	0,200	0,150		18
6	0,085	400	200	300	350	0,250	0,250	0,200	0,350	22

Задача 6.3.4. Для трубопровода (см. рис. 6.3.3) при заданных $l_1, l_2, l_3, l_{BC}, d_1, d_2, d_3, d_{BC}$ и H_c определить расходы воды Q_1, Q_2 и Q_{BC} на участках 1, 2 и BC, а также напор H_A в узле A, если расход воды на третьем участке Q_3 известен.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 6.3.4.

Таблица 6.3.4

№ варианта	$Q_3, \text{ м}^3/\text{с}$	$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$l_3, \text{ м}$	$l_{BC}, \text{ м}$	$d_1, \text{ м}$	$d_2, \text{ м}$	$d_3, \text{ м}$	$d_{BC}, \text{ м}$	$H_c, \text{ м}$
1	0,030	300	200	250	400	0,250	0,200	0,200	0,350	10,0
2	0,0310	400	200	300	350	0,250	0,250	0,250	0,300	15,0
3	0,0250	350	250	300	350	0,250	0,200	0,150	0,350	5,0
4	0,027	400	200	300	350	0,300	0,250	0,250	0,300	14
5	0,04	300	200	250	400	0,250	0,200	0,150	0,300	18
6	0,029	400	200	300	350	0,250	0,250	0,200	0,350	22

Задача 6.3.5. Для трех последовательно соединенных участков горизонтального трубопровода (рис. 6.3.4) построить пьезометрическую линию и определить отметку уровня воды в водонапорной башне. Трубы стальные новые.

Расчет выполнить при данных, приведенных в табл. 6.3.5.

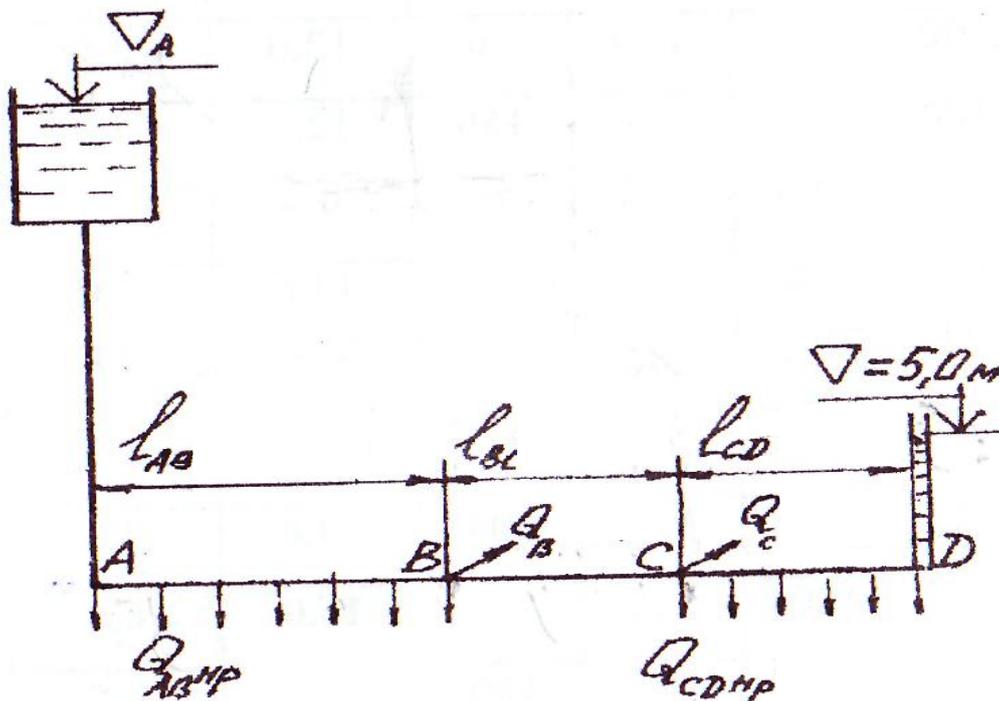


Рис. 6.3.4. Расчетная схема к задаче 6.3.5

Таблица 6.3.5

№ варианта	L_{AB} , м	L_{BC} , м	L_{CD} , м	Q_{AB}^{HP} , л/с	Q_{AB}^{HP} , л/с	Q_B , л/с	Q_C , л/с
1	300	200	250	4	2,50	6	3
2	400	200	300	3,50	2,50	5	5,6
3	350	250	300	3,50	2,50	4	6,1
4	400	200	300	3,50	3,00	5,5	8,7
5	300	200	250	4,00	2,50	6	3,4
6	400	200	300	3,50	2,50	4,5	7,4

Задача 6.3.6. Определить пропускную способность Q_D трубопровода для случаев:

- участки трубопровода соединены последовательно (рис. 6.3.5а);
- параллельно (рис. 6.3.5б).

Трубы стальные.

Числовые данные для 18 вариантов расчета приведены в табл. 6.3.6.

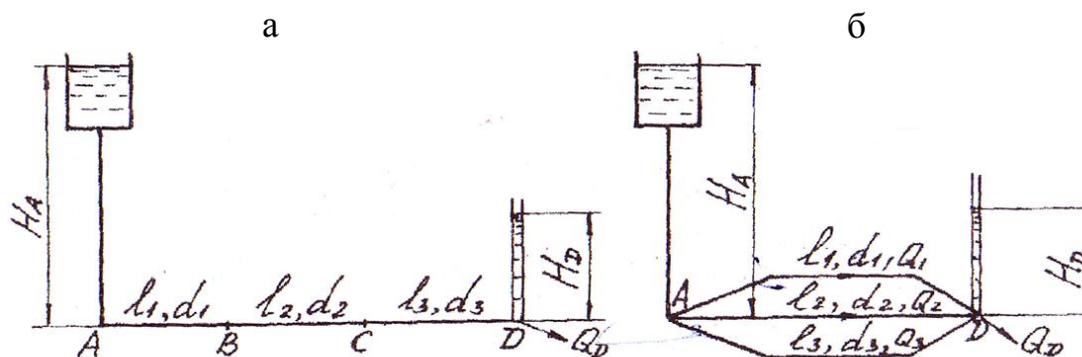


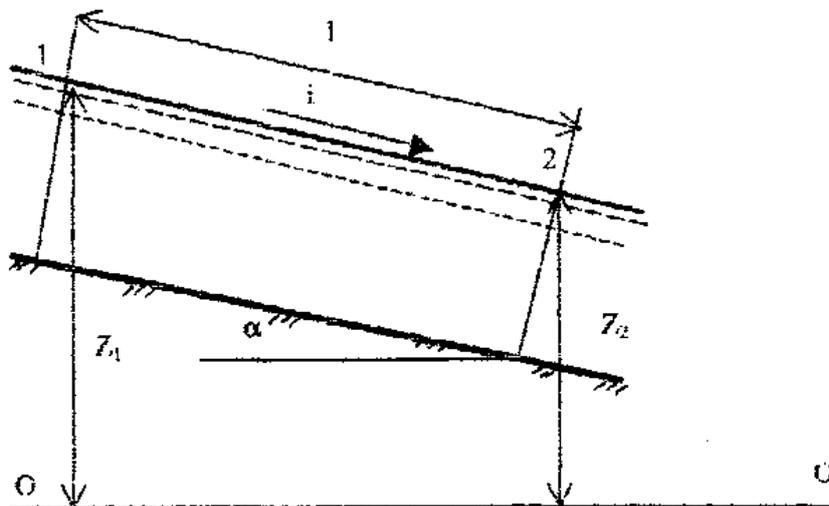
Рис. 6.3.5. Расчетные схемы трубопровода к задаче 6.3.6:
а – участки трубопровода соединены последовательно; б – параллельно

Таблица 6.3.6

№ варианта	Диаметры труб			Длины участков			Полные напоры	
	d_1 , м	d_2 , м	d_3 , м	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	H_A , м	H_D , м
1	0,200	0,150	0,100	20	60	90	11,0	3,5
2	0,200	0,125	0,100	120	70	60	12,8	4,0
3	0,250	0,200	0,150	180	40	110	12,6	6,0
4	0,150	0,200	0,125	70	40	130	11,0	5,0
5	0,150	0,125	0,150	160	115	60	10,8	4,0
6	0,200	0,125	0,100	190	70	80	11,0	2,0
7	0,150	0Д25	0,150	170	80	90	9,4	2,0
8	0,150	0,125	0,100	210	105	50	10,00	3,0
9	0,200	0,150	0,125	260	130	140	11,5	4,0
10	0,250	0,150	0,100	180	130	70	12,0	3,0
11	0,250	0,125	0,100	240	300	156	12,5	4,0
12	0,250	0,150	0,125	270	165	75	9,0	2,5
13	0,300	0,250	0,150	410	315	230	13,6	4,0
14	0,200	0,100	0,750	320	240	95	9,2	3,0
15	0,300	0,200	0,150	330	215	165	10,0	3,5
16	0,300	0,150	0,125	105	130	208	13,6	3,5
17	0,300	0,200	0,150	180	225	120	16,0	6,0
18	0,250	0,200	0,125	240	170	160	14,5	6,5

7. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОТРЫТЫХ КАНАЛОВ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ

Открытыми каналами называют безнапорные водотоки. В отличие от рассмотренных выше случаев напорного движения жидкости, при которых живое сечение потока совпадало с поперечным сечением трубопровода, в случае безнапорного движения в канале лишь часть периметра потока ограничена твердой поверхностью и всегда имеется свободная поверхность – граница между газом и жидкостью. Давление на свободной поверхности жидкости в открытом канале можно принять постоянным вдоль потока и равным атмосферному. В этом случае движение жидкости происходит только за счет силы тяжести и требует наличия уклона местности либо разности уровней жидкости в начальном и конечном сечениях сечениях канала (рисунок). При этом, если размеры и форма живого сечения потока, шероховатость стенок канала, гидравлический уклон и средняя скорость движения жидкости по длине канала остаются неизменными, то такое движение называют равномерным движением жидкости.



Продольное сечение безнапорного потока

При равномерном движении глубина потока h остается постоянной по всей длине канала.

Очевидно, что вся энергия, которую получает поток за счет работы силы тяжести, расходуется на преодоление сил трения, создающих сопротивление движению, а кинетическая энергия потока $\frac{v^2}{2g}$ не изменяется вдоль течения. Глубина, при которой в призматическом канале имеет место равномерное движение, называется нормальной и обозначается как h_0 .

7.1. Основные расчетные зависимости и типы задач

В случае равномерного движения пьезометрическая линия совпадает с уровнем воды и потери напора можно определить:

$$h_l = z_1 - z_2, \quad (7.1)$$

откуда

$$i = \frac{h_l}{l} = \frac{z_1 - z_2}{l} = \sin \alpha. \quad (7.2)$$

При равномерном движении жидкости в канале гидравлический уклон равен уклону дна канала.

Основными расчетными зависимостями для каналов являются формулы Шези для определения средней скорости течения и расхода:

$$V = C\sqrt{Ri}; \quad (7.3)$$

$$Q = \omega C\sqrt{Ri},$$

где V – средняя скорость движения жидкости, м/с; Q – расход, м³/с; C – коэффициент Шези, м^{0.5}/с; R – гидравлический радиус, вычисляемый по формуле $R = \frac{\omega}{\chi}$, м; ω – площадь живого сечения потока, м²; χ – смоченный периметр, м; i – гидравлический уклон; l – расстояние между сечениями.

Большинство формул для установления коэффициента Шези C представляют собой эмпирические зависимости, действительные лишь для определенных значений скоростей и гидравлических радиусов.

Наиболее часто применяется формула Маннинга:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}, \quad (7.4)$$

где n – коэффициент шероховатости, зависящий от материала стенок канала и качества поверхности (его значения для ряда характерных поверхностей приведены в прилож. 11).

Расход воды при единичном уклоне называется расходной характеристикой K (модулем расхода), м³/с:

$$K = \frac{Q}{\sqrt{i}}. \quad (7.5)$$

Скорость при единичном уклоне называется скоростной характеристикой W , м/с:

$$W = \frac{v}{\sqrt{i}} = C\sqrt{R}. \quad (7.6)$$

Большое значение имеет правильный выбор скорости движения воды в канале. Слишком малые скорости требуют большого сечения канала и способствуют его заилению. Чрезмерно большие скорости могут вызвать размыв и разрушение стенок. Предельная минимальная назначаемая скорость движения воды в канале называется незаиляющей

скоростью $V_{\text{незаи}}$, а предельная максимальная скорость – неразмывающей скоростью $V_{\text{неразм}}$.

Необходимо, чтобы скорость воды в канале V была

$$V_{\text{незаи}} < V < V_{\text{неразм}} \quad (7.7)$$

Допускаемая неразмывающая скорость зависит от рода грунта, типа облицовки канала и глубины воды в нем и может быть установлена, например, по формуле И.И. Леви:

$$V_{\text{неразм}} = 3\sqrt{gd} \lg \frac{R}{7d}, \quad (7.8)$$

где d – средний диаметр частиц, образующих русло.

Допускаемая незаиляющая скорость воды в канале зависит главным образом от характера взвешенных в воде наносов и определяется, например, по формуле Е.А. Замарина:

$$V_{\text{незаи}} = 1,5 \sqrt{\frac{\rho M \sqrt{W}}{0,022 \sqrt{Ri}}}, \quad (7.9)$$

где ρ – мутность потока, кг/м³; W – средневзвешенная гидравлическая крупность наносов, м/с; M – коэффициент, принимаемый равным W при $W > 0,002$ м/с и равным 0,002 при $W < 0,002$ м/с.

Форма поперечного сечения канала выбирается в зависимости от его размеров, характера грунта, облицовки, назначения и т. д. Наиболее часто используются каналы трапецеидального сечения, для которых:

$$\omega = (b + mh)h; \quad (7.10)$$

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2}, \quad (7.11)$$

где b – ширина канала по дну, м; h – глубина наполнения канала, м; $m = \text{ctg } \alpha$ – коэффициент откоса канала (рис. 7.1.1).

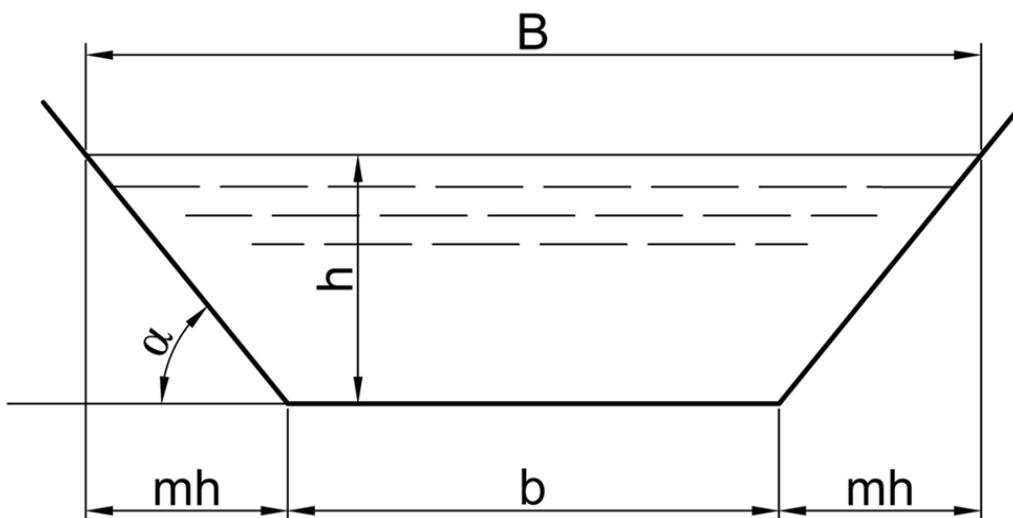


Рис. 7.1.1. Канал трапецеидального сечения

Коэффициент откоса выбирается из условий устойчивости в зависимости от качества грунта и способа крепления откоса.

Сечение канала, у которого при заданной площади живого сечения потока ω , уклоне i и заданной шероховатости стенок расход оказывается наибольшим, называется гидравлически наивыгоднейшим сечением.

При проектировании трапецеидальных каналов отношение ширины канала по дну к глубине $\beta = \frac{b}{h}$ в некоторых случаях может быть принято гидравлически наивыгоднейшим и определяемым по формуле

$$\beta_{\text{опт}} = 2(\sqrt{1+m^2} - m). \quad (7.12)$$

Однако такое сечение не всегда оказывается экономически и технологически наивыгоднейшим, поэтому на практике в основу выбора значения β , если нет других ограничивающих условий, должна быть положена экономичность поперечного профиля с точки зрения объема и способа выполнения работ.

Представленные выше зависимости могут быть использованы при расчете движения воды и других жидкостей. Этим же зависимостям подчиняется и движение жидкости в канализационных, дренажных и водосточных трубах при неполном заполнении поперечного сечения. Для облегчения их расчетов широко применяются графики средней скорости и расхода в зависимости от степени заполнения поперечного сечения трубы.

Основные типы задач гидравлического расчета трапецеидальных каналов при равномерном движении воды сводятся к пяти типам.

Задача I типа. Определить гидравлический уклон i , если заданы величины расхода Q , нормальной глубины h , ширины канала по дну b , коэффициента шероховатости n и заложения откоса m ?

Решение. Задача решается прямой подстановкой в формулу Шези, записываемую в виде

$$i = \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}, \quad (7.13)$$

где ω – площадь живого сечения (вычисляется по формуле (7.10)), м²; χ – смоченный периметр (вычисляется по формуле (7.11)), м; R – гидравлический радиус, м; C – коэффициент Шези, м^{0,5}/с.

Задача II типа. Определить расход воды в канале Q , если заданы величины гидравлического уклона i , нормальной глубины h , ширины канала по дну b , коэффициента шероховатости n и заложения откоса m .

Решение. Задача решается аналогично предыдущей с помощью формулы Шези, записанной в виде

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}. \quad (7.14)$$

Задача III типа. Определить ширину канала по дну b , если заданы величины гидравлического уклона i , расхода воды в канале Q , нормальной глубины h , коэффициента шероховатости n и коэффициента откоса m .

Решение. Задача решается методом подбора графически или аналитически. Задавая ряд значений b , определяют, как и в задаче II типа, расход для каждого задаваемого b и строят график зависимости $Q = f(b)$, а затем по заданному значению $Q_{зад}$ находят искомую ширину канала $b_{иск}$ (рис. 7.1.2а).

Задача IV типа. Определить нормальную глубину h , если заданы величины гидравлического уклона i , расхода воды в канале Q , ширины канала по дну b , коэффициента шероховатости n и коэффициента откоса m .

Задача решается аналогично предыдущей, т. е. задавая ряд значений h , определяют расход для каждой задаваемой глубины и строят график зависимости $Q = f(h)$, а затем по заданному значению $Q_{зад}$ находят искомую глубину $h_{иск}$ (рис. 7.1.2б).

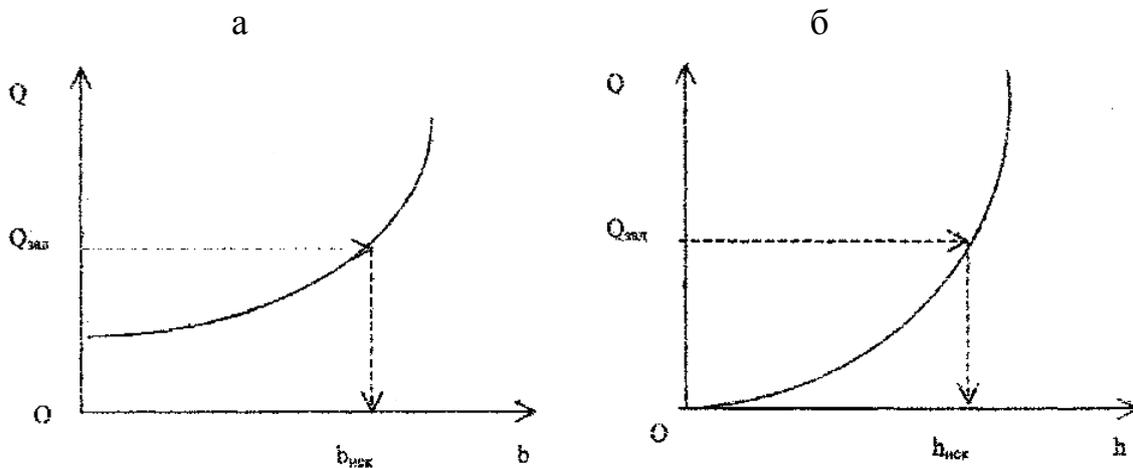


Рис. 7.1.2. Графическое решение задач III и IV типов:
а – искомая ширина канала $b_{иск}$; б – искомая глубина $h_{иск}$

Задача V типа. Определить нормальную глубину h и ширину канала по дну b , если заданы величины гидравлического уклона i , расхода воды в канале Q , относительная ширина канала $\beta_{гн} = \frac{b}{h}$, коэффициента шероховатости n и коэффициента заложения откоса m .

Решение. Задача решается в такой последовательности: задавая ряд значений h , находят соответствующие $b = \beta_{гн}h$, а затем строят график зависимости $Q = f(h)$ и по заданному расходу $Q_{зад}$ определяют искомую $h_{иск}$. Установив $h_{иск}$ по графику, находят $b = \beta h_{иск}$. В расчетных зависимостях (7.10), (7.11) b выражают как $b = \beta h$.

7.2. Примеры решения задач

Задача 7.2.1. Определить расход при равномерном движении воды в трапецеидальном канале, проложенном в суглинках, если ширина его по дну $b = 5,5$ м, глубина $h = 1,8$ м, коэффициент откоса $m = 1$ и уклон дна $i = 0,0004$.

Решение. Расход воды Q вычислим по (7.14), предварительно определив среднюю скорость течения в канале по формуле

$$V = C\sqrt{Ri}, \text{ м/с.}$$

Площадь живого сечения находим по формуле (7.10):

$$\omega = (5,5 + 1 \cdot 1,8) \cdot 1,8 = 13,14 \text{ м}^2,$$

смоченный периметр – по формуле (7.11):

$$\chi = 5,5 + 2 \cdot 1,8\sqrt{1+1^2} = 10,58 \text{ м.}$$

Гидравлический радиус

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{13,14}{10,58} = 1,24 \text{ м.}$$

Определяем коэффициент Шези C по формуле Маннинга (см. формулу (7.4)).

Коэффициент шероховатости берем из прилож. 11: $n = 0,025$. Тогда

$$C = \frac{1}{0,025} 1,24^{\frac{1}{6}} = 41,5 \text{ м}^{0,5}/\text{с.}$$

Скорость течения в канале

$$V = 41,5\sqrt{1,24 \cdot 0,0004} = 0,92 \text{ м/с.}$$

Сравним полученную скорость с максимальной неразмывающей скоростью и наименьшей незаилающей.

Для каналов в средних суглинках $V_{неразм} = 1,0$ м/с. Вторая может быть определена по справочным таблицам в зависимости от d_{cp} и h . В данном случае $V_{неразм} = 0,57$ м/с. Поскольку $0,57 \text{ м/с} < 0,92 \text{ м/с} < 1,0 \text{ м/с}$, то канал считается устойчивым к размыву и не подвергается заилению.

Расход воды в канале при заданных условиях составит:

$$Q = \omega V = 13,14 \cdot 0,92 = 12,1 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Задача 7.2.2. При каком наполнении h бетонный канал трапецеидального сечения пропустит расход $Q = 38 \text{ м}^3/\text{с}$, если ширина его $b = 25$ м, коэффициент откоса $m = 0,5$, уклон дна $i = 0,00025$?

Решение. Задачу решаем подбором. Определяем модуль расхода для заданного Q из формулы (7.5):

$$K = \frac{Q}{\sqrt{i}} = \frac{38}{\sqrt{0,00025}} = 2403 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Беря различные значения глубин, вычисляем соответствующие им модули расхода по формуле

$$K = \omega C \sqrt{R}.$$

Результаты расчетов сводим в табл. 7.2.1.

Таблица 7.2.1

$h, \text{ м}$	$\omega, \text{ м}$	$\chi, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$C, \text{ м}^{0.5}/\text{с}$	$K, \text{ м}^3/\text{с}$
2,9	77,75	31,5	2,44	81,2	9725
2	52	29,48	1,77	77,7	5 350
1	25,5	27,24	0,935	70,5	1738
1,2	30,7	27,7	1,11	72,37	2 340

Начертив по данным табл. 7.2.1 график $K = f(h)$ (рис. 7.2.1), находим, что модуль расхода $K = 2420 \text{ м}^3/\text{с}$ и соответствует глубине $h = 1,2 \text{ м}$.

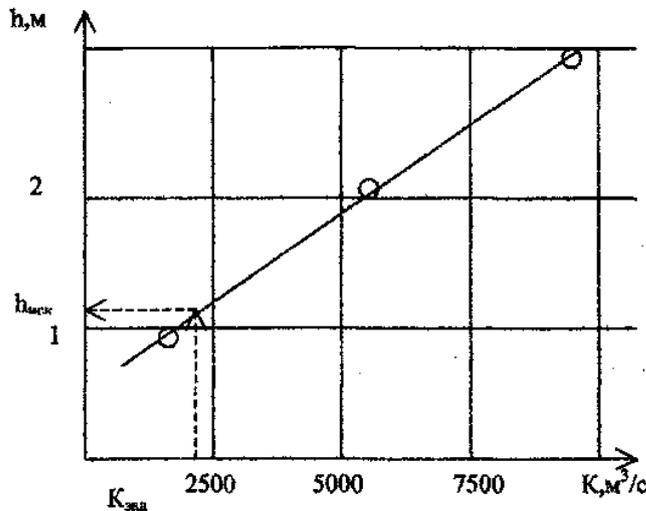


Рис. 7.2.1. График $K = f(h)$

Задача 7.2.3. Определить размеры земляного канала гидравлически наивыгоднейшего сечения, который при уклоне $i = 0,001$ будет пропускать расход $Q = 4 \text{ м}^3/\text{с}$.

Канал имеет трапециевидальную форму сечения с заложением откосов $m = 2$.

Решение. Решаем задачу методом подбора.

Определяем модуль заданного расхода из формулы (7.5):

$$K = \frac{Q}{\sqrt{i}} = \frac{4}{\sqrt{0,001}} = 126,5 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Беря различные значения глубин, вычисляем соответствующие им модули расхода. При этом ширину канала по дну b определяем по формуле

$$b = 2h(\sqrt{1+m^2} - m).$$

При $h = 1$ м имеем:

$$b = 2 \cdot 1 \left(\sqrt{1+2^2} - 2 \right) = 0,47 \text{ м};$$

$$\omega = (0,47 + 2 \cdot 1) \cdot 1 = 2,47 \text{ м}^2;$$

$$\chi = 0,47 + 2 \cdot 1 \sqrt{1+2^2} = 4,93 \text{ м};$$

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{2,47}{4,93} = 0,5 \text{ м}.$$

Коэффициент шероховатости n для земляного канала принимаем, согласно прилож. 11, равным 0,025. При этом коэффициент Шези

$$C = \frac{1}{0,025} 0,5^{\frac{1}{6}} = 34 \text{ м}^{0,5}/\text{с}.$$

Модуль расхода

$$K = \omega C \sqrt{R} = 2,47 \cdot 34 \cdot \sqrt{0,5} = 59,4 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Аналогично вычисляем модули расхода для других значений глубин. Полученные данные сводим в табл. 7.2.2.

Таблица 7.2.2

$h, \text{ м}$	$b, \text{ м}$	$\omega, \text{ м}^2$	$\chi, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$C, \text{ м}^{0,5}/\text{с}$	$K, \text{ м}^3/\text{с}$
1,0	0,47	2,47	4,93	0,5	34	59,4
1,2	0,574	3,57	5,939	0,598	35,55	97,7
1,5	0,705	5,57	7,4	0,75	37,5	181
1,32	0,72	4,32	7,53	0,758	37,35	127,8

Начертив по данным табл. 7.2.2 график $K = f(h)$ (рис. 7.2.2), находим, что модуль заданного расхода $K = 127,5 \text{ м}^3/\text{с}$ и соответствует глубине $h = 1,32 \text{ м}$. Проверочное вычисление показало, что модуль расхода, соответствующий глубине $h = 1,32 \text{ м}$, практически равен модулю заданного расхода. На основании этого принимаем размеры канала: $b = 0,72 \text{ м}$; $h = 1,32 \text{ м}$.

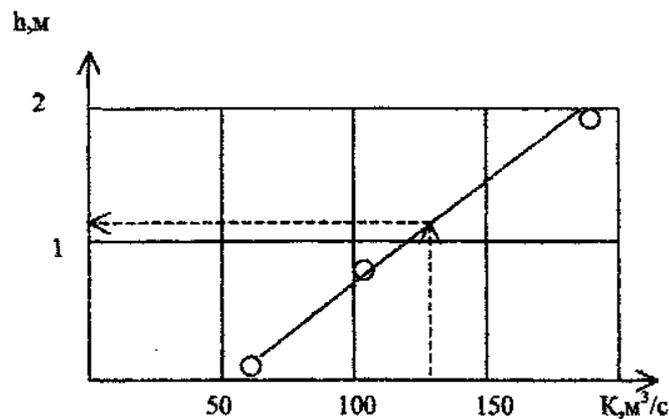


Рис. 7.2.2. К задаче 7.2.3

Задача 7.2.4. Определить скорость движения воды V и расход Q в керамической трубе диаметром $d = 300$ мм при степени наполнения $a = h/d = 0,7$ и уклоне дна $i = 0,008$.

Решение. Живое сечение потока имеет вид, представленный на рис. 7.2.3.

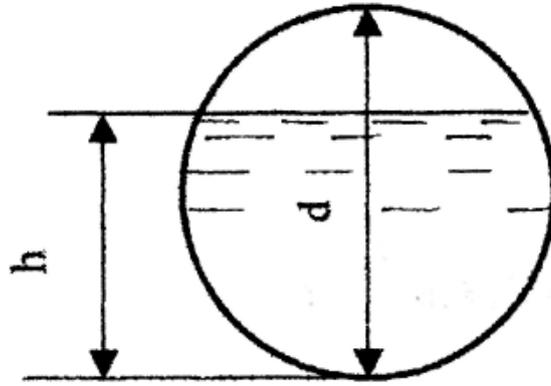


Рис. 7.2.3. Живое сечение потока (к задаче 7.2.4)

Площадь живого сечения

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4} \frac{\phi}{2\pi} + d^2 (a - 0,5) \sqrt{a(1-a)};$$

$$\sin \alpha = a / 0,5 - 1 = 0,7 / 0,5 - 1 = 0,2;$$

$$\alpha = 0,201 \text{ рад}; \phi = \pi + 2 - 0,201 = 3,54 \text{ рад};$$

$$\omega = \frac{3,14 \cdot 0,3^2}{4} \frac{3,54}{2 \cdot 3,14} + 0,3^2 (0,6 - 0,5) \sqrt{0,6(1-0,6)} = 0,044 \text{ м}^2.$$

Смоченный периметр

$$\chi = \frac{\pi d \phi}{2\pi} = \frac{3,14 \cdot 0,3 \cdot 3,54}{2 \cdot 3,14} = 0,53 \text{ м.}$$

Гидравлический радиус

$$R = \omega / \chi = 0,044 / 0,53 = 0,083 \text{ м.}$$

Для керамических труб коэффициент шероховатости $n = 0,013$ (см. прилож. 11).

Коэффициент Шези

$$C = \frac{1}{0,013} 0,083^{\frac{1}{6}} = 52,7 \text{ м}^{0,5} / \text{с.}$$

Скорость движения воды

$$V = 52,7 \sqrt{0,083 \cdot 0,008} = 1,36 \text{ м/с.}$$

Расход воды, протекающей по трубе:

$$Q = \omega \cdot V = 0,044 \cdot 1,36 = 0,0598 \text{ м}^3.$$

7.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 7.3.1. Определить среднюю скорость течения V и расход Q воды в канале трапецеидального сечения. Ширина канала по дну $b = ___ \text{ м}$, коэффициент откосов $m = ___$, глубина наполнения $h = ___ \text{ м}$, уклон дна $i = _____$. Стенки канала гладкие земляные; движение равномерное.

Данные приведены в табл. 7.3.1.

Таблица 7.3.1

№ варианта	$b, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	m	i
1	3	1	1,5	0,002
2	3,4	1,66	1,75	0,0018
3	3,9	1,34	2	0,0024
4	4	2	1,5	0,002
5	5	2	1,75	0,0018
6	5,6	3,5	2	0,0015

Задача 7.3.2. Кювет, стенки которого забетонированы, имеет в сечении форму треугольника с углом вершины $\alpha = ___^\circ$ и высотой $h = ___ \text{ м}$, должен пропускать расход $Q = _____ \text{ л/с}$ воды, не переполняясь.

Определить уклон дна i .

Данные приведены в табл. 7.3.2.

Таблица 7.3.2

№ варианта	$\alpha, ^\circ$	$h, \text{ м}$	$Q, \text{ л/с}$
1	90	1	200
2	80	1,66	250
3	100	1,34	230
4	120	2	340
5	80	2	320
6	95	3,5	500

Задача 7.3.3. Имеем канал с хорошей бутовой облицовкой трапецеидального профиля ($b = ___ \text{ м}$, $H = ___ \text{ м}$, $\alpha = _____^\circ$). При низкой воде глубина наполнения $h = 0,5 \text{ м}$, а при высокой воде канал наполняется до краев. В каком отношении находятся расходы при высокой и низкой воде?

Данные приведены в табл. 7.3.3.

Таблица 7.3.3

№ варианта	$b, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	α
1	2	3	4
1	3	1	45
2	4	2	60

Окончание табл. 7.3.3

1	2	3	4
3	5	3	70
4	4	4	30
5	5	2	40
6	6	4	45

Задача 7.3.4. Какую ширину b должен иметь канал прямоугольного сечения длиной $l = \underline{\hspace{2cm}}$ м, вырытый в естественном грунте на глубину $H = \underline{\hspace{2cm}}$ м, если для пропуска воды в количестве $Q = \underline{\hspace{2cm}}$ м³/с используется естественная разность отметок его концов $\Delta z = \underline{\hspace{2cm}}$ м.

Данные приведены в табл. 7.3.4.

Таблица 7.3.4

№ варианта	l , м	H , м	Q , м ³ /с	Δz , м
1	1100	3	600	5
2	1000	2,5	600	4,5
3	2100	3	700	6
4	1900	4	300	6
5	1000	2	400	5
6	900	4	450	4,5

Задача 7.3.5. Бетонированный канал-лоток имеет форму прямоугольника с основанием $b = \underline{\hspace{2cm}}$ м. Уклон дна канала составляет 1:10000. Какую глубину h должен иметь канал, чтобы при расходе $Q = \underline{\hspace{2cm}}$ м³/с он не переполнялся.

Данные приведены в табл. 7.3.5.

Таблица 7.3.5

№ варианта	b , м	Q , м ³ /с
1	1,1	0,600
2	1	0,600
3	2,1	0,700
4	1,9	0,300
5	1	0,400
6	0,9	0,450

Задача 7.3.6. Рассчитать трапецеидальный канал гидравлически наивыгоднейшего очертания и определить уклон его дна i , необходимый для пропуска расхода $Q = \underline{\hspace{2cm}}$ м³/с при средней скорости $V = \underline{\hspace{2cm}}$ м/с. Стенки и дно канала выложены крупным камнем; коэффициент откоса $m = \underline{\hspace{2cm}}$.

Данные приведены в табл. 7.3.6.

Таблица 7.3.6

№ варианта	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$V, \text{ м/с}$	m
1	10	0,7	1,5
2	15	0,75	1,75
3	29	0,7	2
4	12	0,75	1,5
5	16	0,7	1,75
6	18	0,75	2

Задача 7.3.7. Определить ширину трапецеидального канала по дну b , имеющего коэффициент откоса $m = ___$ при глубине $h = ___ \text{ м}$ и уклоне дна $i = ___$, если в канале имеет место равномерное движение и расход воды $Q = ___ \text{ м}^3/\text{с}$. Материал стенок канала – плотная глина.

Данные приведены в табл. 7.3.7.

Таблица 7.3.7

№ варианта	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$h, \text{ м}$	m	i
1	10	1,7	2,5	0,00004
2	15	1,75	2,75	0,00005
3	29	1,25	2	0,00006
4	12	1,0	2,5	0,00004
5	16	1,7	2,75	0,00005
6	18	1,25	2,25	0,00006

Задача 7.3.8. Определить гидравлически наивыгоднейшие размеры канала трапецеидального сечения для пропуска воды в количестве $Q = ___ \text{ м}^3/\text{с}$, уклон дна канала $i = ___$, коэффициент откоса $m = ___$; стенки канала земляные.

Данные приведены в табл. 7.3.8.

Таблица 7.3.8

№ варианта	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	m	i
1	10	2,5	0,0004
2	15	2,75	0,0005
3	29	2	0,0006
4	12	2,5	0,0004
5	16	2,75	0,0005
6	18	2,25	0,0006

Задача 7.3.9. Рассчитать заложение откоса стенок гидравлически наивыгоднейшего канала трапецеидальной формы для пропуска расхода воды $Q = ___ \text{ м}^3/\text{с}$ при глубине наполнения канала $h = ___ \text{ м}$ и уклоне его дна $i = ___$; стенки канала бетонные.

Данные приведены в табл. 7.3.9.

Таблица 7.3.9

№ варианта	Q , м ³ /с	h , м	i
1	10	1,7	0,00004
2	15	1,75	0,00005
3	29	1,25	0,00006
4	12	1,0	0,00004
5	16	1,7	0,00005
6	18	1,25	0,00006

Задача 7.3.10. Определить ширину канала по дну b и ширину по урезу B для условий предыдущей задачи при $m = 1,5$.

Задача 7.3.11. В канале прямоугольного сечения шириной $b = \underline{\hspace{1cm}}$ м течет поток воды. Глубина потока в рассматриваемом сечении $h = \underline{\hspace{1cm}}$ м. Стенки канала бетонные, грубые. Расход воды $Q = \underline{\hspace{1cm}}$ м³/с.

Определить характер течения жидкости, если уклон дна канала $i = \underline{\hspace{1cm}}$.
Данные приведены в табл. 7.3.10.

Таблица 7.3.10

№ варианта	Q , м ³ /с	h , м	b , м	i
1	20	2,7	10	0,0004
2	25	2,75	8	0,0005
3	29	2,25	9	0,0006
4	22	3,0	14	0,0004
5	26	2,7	12	0,0005
6	28	2,25	12	0,0006

Задача 7.3.12. Проектируется канал наивыгоднейшего трапецеидального сечения, предназначенный для пропуска воды в количестве $Q = \underline{\hspace{1cm}}$ м³/с, которая забирается из реки. Вместе с ней в канал попадают и донные наносы крупностью до $d = \underline{\hspace{1cm}}$ мм.

Выбрать скорость V , при которой канал не заилется и не размывается, если грунт, в котором он прорыт, представляет собой глину.

Определить также наивыгоднейшие размеры канала и его уклон i , если коэффициент откосов $m = \underline{\hspace{1cm}}$ и коэффициент шероховатости стенок и дна $n = \underline{\hspace{1cm}}$. Данные приведены в табл. 7.3.11.

Таблица 7.3.11

№ варианта	Q , м ³ /с	d , мм	m	n
1	20	2,7	1,5	0,025
2	25	2,75	1,75	0,02
3	29	2,25	2,5	0,025
4	22	3,0	2,25	0,02
5	26	2,7	2	0,02
6	28	2,25	2	0,025

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Значения кинематического коэффициента вязкости ν воды в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6$						
1	1,73	9	1,35	17	1,09	30	0,80
2	1,67	10	1,31	18	1,06	35	0,73
3	1,62	11	1,27	19	1,04	40	0,66
4	1,57	12	1,24	20	1,01	45	0,60
5	1,52	13	1,21	22	0,99	50	0,56
6	1,47	14	1,18	24	0,92	55	0,51
7	1,43	15	1,15	26	0,88	60	0,48
8	1,39	16	1,12	28	0,84	70	0,41

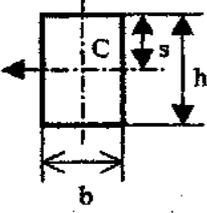
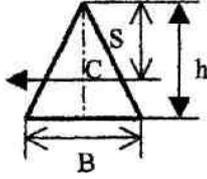
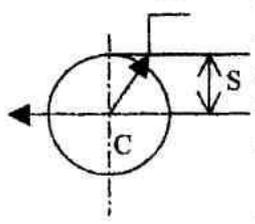
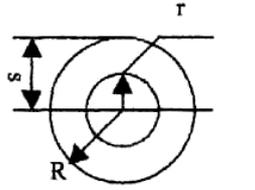
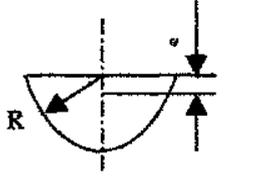
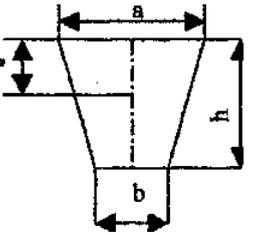
Приложение 2. Объемный вес γ , плотность ρ и коэффициент кинематической вязкости ν некоторых жидкостей

Наименование жидкости	$\rho, \text{кг/м}^3$		$\nu, \text{см}^2/\text{с}$			
	20 $^\circ\text{C}$	50 $^\circ\text{C}$	20 $^\circ\text{C}$	40 $^\circ\text{C}$	60 $^\circ\text{C}$	80 $^\circ\text{C}$
Анилин	1040		0,043			
Бензин	880		0,0073	0,0059	0,0049	
Вода пресная	998,2		0,01012	0,0065	0,0047	0,0036
Глицерин безводный	1250		9,7	3,3	0,88	0,38
Керосин	800		0,025	0,018	0,012	0,010
Масло:						
касторовое	960		15	3,5	0,88	0,35
трансформаторное	884	880	0,28	0,13	0,076	0,084
АМГ-10		850	0,17	0,11	0,085	0,065
веретенное АУ		892	0,48	0,19	0,098	0,059
индустриальное 12		883	0,48	0,19	0,098	0,059
индустриальное 20		891	0,85	0,33	0,14	0,080
индустриальное 30		901	1,8	0,56	0,21	0,11
индустриальное 50		910	5,3	1,1	0,38	0,16
турбинное		900	0,97	0,38	0,16	0,088
Ртуть	13547		0,0016	0,0014	0,0010	
Спирт этиловый	789		0,00151			
Эфир этиловый	715		0,00363			

Примечание. Плотность жидкости при другой температуре можно

определить по формуле $\rho_m = \frac{\rho}{1 + \alpha \Delta T}$, где ρ_m – плотность жидкости при температуре $T = T_0 + \Delta T$; ΔT – изменение температуры; T_0 – температура, при которой плотность жидкости равна ρ ; α – коэффициент температурного расширения жидкости (например, для минеральных масел в среднем можно принять $\alpha = 0,00071/^\circ\text{C}$).

Приложение 3. Момент инерции J_c плоских фигур относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести

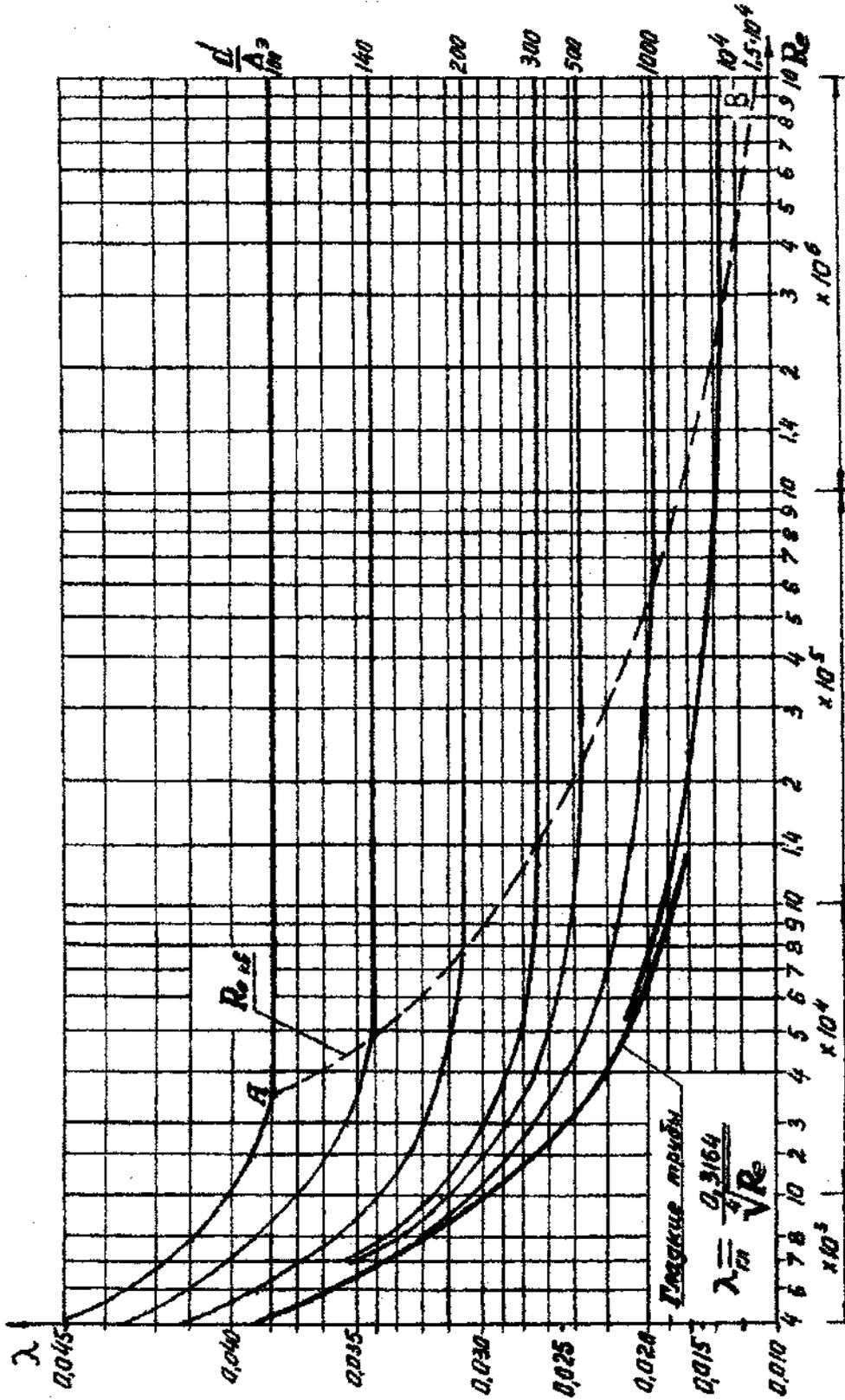
Фигура	J_c	s	ω
	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{h}{2}$	bh
	$\frac{bh^3}{36}$	$\frac{2h}{3}$	$\frac{bh}{2}$
	$\frac{\pi R^4}{4}$	R	πR^2
	$\frac{1}{4} \pi (R^4 - r^4)$	R	$\pi (R^2 - r^2)$
	$\frac{9\pi^2 - 64}{72\pi} R^4$	$\frac{4R}{3\pi}$	$\frac{1}{2} \pi R^2$
	$\frac{1}{36} h^3 \frac{a^2 + 4ab + b^2}{a + b}$	$\frac{1}{3} h \frac{a + 2b}{a + b}$	$\frac{1}{2} h(a + b)$

Примечание. s – координата центра тяжести; ω – площадь.

**Приложение 4. Значения эквивалентной шероховатости для труб
из различных материалов**

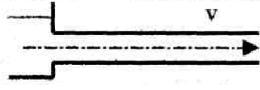
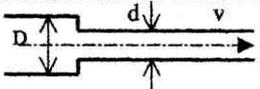
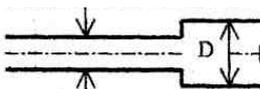
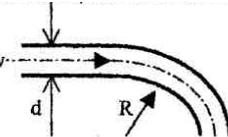
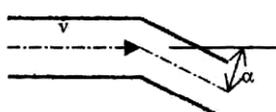
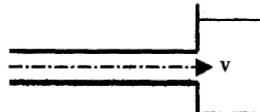
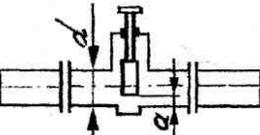
Трубы, их материал и состояние	$\Delta_{\text{экв}}$, мм
Цельнотянутые трубы:	
новые технические гладкие из стекла, латуни, меди, свинца	0,0015–0,01
то же из алюминия	0,015–0,06
стальные новые	0,02–0,05
стальные после нескольких лет эксплуатации, очищенные и битумизированные	0,15–0,3
Стальные сварные трубы:	
новые	0,04–0,1
бывшие в эксплуатации	0,1–0,15
умеренно заржавленные	0,3–0,7
старые заржавленные	0,8–1,5
сильно заржавленные с большими отклонениями	2–4
Оцинкованные стальные трубы:	
новые чистые	0,07–0,15
бывшие в эксплуатации	0,18
Чугунные трубы:	
новые	0,25–1
новые битумизированные	0,15
асфальтированные	0,12–0,3
бывшие в эксплуатации	1–1,5
со значительными отложениями	2–4
очищенные, после многих лет эксплуатации	0,3–1,5
Бетонные и другие трубы:	
бетонные, хорошая поверхность с затиркой	0,3–0,8
то же при среднем качестве работ; железобетонные	2,5
то же при грубой поверхности	3–9
асбестоцементные новые	0,05–0,1
то же, бывшие в эксплуатации	0,6
Рукава и шланги резиновые	0,03

Приложение 5

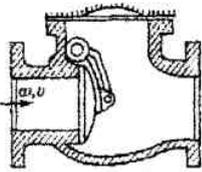
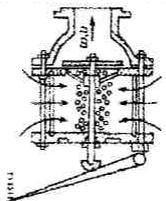


Зависимость λ от Re для труб с естественной шероховатостью (график Г.А. Мурина)

**Приложение 6. Значения коэффициентов ζ_m
некоторых местных сопротивлений
в квадратичной области сопротивления**

Тип сопротивления	Схема сопротивления	Значения коэффициента ζ_m		
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>		
Вход в трубу		0,5		
Внезапное сужение		$0,5 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]$		
Внезапное расширение		$\left[\left(\frac{D}{d} \right)^2 - 1 \right]^2$		
Плавный поворот		<i>d / R</i>		
		0,2	0,14	
		0,4	0,21	
		0,6	0,44	
Крутой поворот		<i>alpha</i>		
		20	0,12	
		30	0,16	
		60	0,56	
Выход из трубы в резервуар		1,0		
		<i>a / d</i>	Простая	Лудло
Задвижка ($\zeta_{задв}$)		0,1	160	200
		0,2	35	33
		0,3	10	11
		0,4	4,6	4,7
		0,5	2,1	2,35
		0,6	0,98	1,23
		0,7	0,44	0,67
		0,8	0,17	0,31
		0,9	0,06	0,11
		1	0,05	0,05

Окончание прилож. 6

1	2	3			4			
Кран пробковый ($\zeta_{п.к}$)		α°			$\zeta_{пк}$			
		10			0,31			
		20			1,84			
		30			6,15			
		40			20,7			
Обратный клапан ($\zeta_{о.к}$)		Диаметр d , мм						
		40	70	100	200	300	500	750
Всасывающий клапан с сеткой ($\zeta_{к.с}$)		1,3	1,4	1,5	1,9	2,1	2,5	0,9
		12	8,5	7,0	4,7	3,7	2,5	1,6
Вентиль (ζ_v)		h / d						
		0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
		13	5,8	2,0	1,4	1,0	0,8	0,5

**Приложение 7. Значения расходных характеристик
(модулей расхода) K для стальных
и чугунных труб при квадратичной области сопротивления**

Внутренний стандартный диаметр трубы d , м	Площадь поперечного сечения трубы ω , м ²	K труб, м ³ /с		
		нормальных (бывших в эксплуатации стальных и чугунных)	новых чугунных	новых стальных
1	2	3	4	5
0,050	0,00196	$8,313 \cdot 10^{-3}$	$9,947 \cdot 10^{-3}$	$10,1 \cdot 10^{-3}$
0,075	0,00442	0,02477	0,02927	0,02970
0,100	0,00785	0,05361	0,06285	0,06373
0,125	0,01227	0,09739	0,11350	0,1151
0,150	0,01766	0,1584	0,18390	0,1863
0,200	0,03142	0,3408	0,3930	0,3980
0,250	0,04906	0,6164	0,7076	0,7163
0,300	0,07065	0,9993	1,1430	1,157

Окончание прилож. 7

1	2	3	4	5
0,350	0,09616	1,503	1,715	1,735
0,400	0,1256	2,140	2,435	2,463
0,450	0,15896	2,920	3,316	3,354
0,500	0,19625	3,857	4,374	4,423
0,600	0,28260	6,239	7,053	7,131
0,700	0,38465	9,362	10,560	10,674
0,800	0,50240	13,301	14,973	15,132
0,900	0,63585	18,129	20,373	20,587
1,000	0,78500	23,911	26,832	27,111
1,10	0,94985	30,709	34,416	34,769
1,20	1,1304	38,601	43,211	43,650
1,30	1,32665	47,604	53,232	53,769
1,40	1,53860	57,807	64,581	65,226

Приложение 8. Значения поправочного коэффициента Θ_1

Вид труб	Значения поправочного коэффициента Θ_1 в зависимости от средней скорости потока v , м/с												
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Нормальные стальные и чугунные	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00					
Новые чугунные	0,81	0,84	0,86	0,87	0,89	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,98	0,99
Новые стальные	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99

Приложение 9. Значение предельных средних скоростей $V_{пред}$, м/с

Трубы	Значение предельных средних скоростей $V_{пред}$, м/с, в зависимости от внутреннего диаметра труб d , м									
	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	1,0	1,4	
Новые стальные	2,8	3,2	3,5	3,7	3,8	3,9	4,0	4,2	4,4	
Новые чугунные	2,5	2,8	3,1	3,3	3,4	3,5	3,6	3,8	4,0	
Нормальные (стальные и чугунные)	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2		1,3			

**Приложение 10. Значения стандартных диаметров d труб
для пропуска рекомендуемых предельных
(из экономических соображений) расходов воды Q**

Внутренний стандартный диаметр d , м	Рекомендуемый предельный расход Q , м ³ /с
0,050	0,0015
0,075	0,003
0,100	0,006
0,125	0,01
0,150	0,015
0,200	0,03
0,250	0,05
0,300	0,074
0,350	0,106
0,400	0,145
0,450	0,190
0,500	0,245
0,600	0,365
0,700	0,520
0,800	0,705
0,900	0,920
1,000	1,200
1,100	1,475

**Приложение 11. Значения коэффициента шероховатости n
естественных и искусственных русел**

Поверхность русла	n
Естественные русла	
Чистое, прямое, незасоренное со свободным течением (глина, мелкий песок, гравий)	0,025
Периодические потоки в очень хорошем состоянии поверхности и формы ложа, но с заметным содержанием наносов	0,033
Сильно засоренные, извилистые русла с заросшими берегами	0,05
Русла горноводопадного типа с валунами и извилистым ложем; искривленные равнинные русла с заводьями и косоструйным течением	0,10
Реки болотного типа; течение с выходом на пойму	0,13
Искусственные русла	
Оштукатуренная цементным раствором поверхность	0,011
Бетонная поверхность без затирки	0,013
Металлическая, гладкая	0,012
Деревянная из строганных досок	0,013
Кирпичная кладка, покрытая цементным раствором	0,015
Бутовая кладка на цементном растворе	0,018
Мощение булыжным камнем	0,02
Одернованная поверхность	0,025
Каменная наброска в плетнях	0,025
Каналы в плотных лессе, земле, мелком гравии	0,017
Большие земляные каналы в хороших условиях содержания	0,02
Большие земляные каналы в удовлетворительных условиях содержания	0,025
Малые земляные каналы при полной планировке дна и откосов	0,0275
Каналы и русла в скальных породах в средних условиях содержания	0,03

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беленков, Ю.А. Гидравлика и гидропневмопривод: учебник / Ю.А. Беленков, А.В. Лепешкин, А.А. Михайлин. М.: Бастет, 2013. 408 с.
2. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы в примерах решения задач: учебное пособие для студентов учреждений высшего профессионального образования / Т.В. Артемьева [и др.]; под ред. С.П. Стесина. М.: Академия, 2013. 208 с.
3. Лойцянский, Л.М. Механика жидкости и газа: учебник для вузов / Л.М. Лойцянский. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
4. Примеры расчетов по гидравлике: учебное пособие для студентов строительных специальностей вузов / А.Д. Альтшуль [и др.]. М.: Стройиздат, 1977. 255 с.
5. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика: учебник для вузов / А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. М.: Стройиздат, 1987. 414 с.
6. Справочник по гидравлике / под ред. В.А. Большакова. Киев: Вища школа, 1984. 343 с.
7. Сборник заданий для выполнения расчетно-графической работы по курсу «Гидравлика и гидравлические машины и компрессоры» / под ред. А.Ш. Барекяна. Калинин: КПИ, 1973. 127 с.
8. Барекян, А.Ш. Задачи по механике жидкости с решениями и рекомендациями по их оформлению: учебное пособие для студентов, обучающихся по техническим направлениям ТГТУ / А.Ш. Барекян, А.К. Челышев. Тверь: ТГТУ, 1997. 158 с.

9. Сборник заданий по гидравлике для гидромелиоративных и гидротехнических факультетов гидромелиоративных институтов / А.В. Андреевская [и др.]. М.: МГМИ, 1968. 260 с.

10. Андреевская, А.В. Задачник по гидравлике: учебное пособие для гидромелиоративных и гидротехнических факультетов и вузов / А.В. Андреевская, Н.Н. Кременецкий, М.В. Панов. М.: Энергия, 1970. 424 с.

11. Шевелев, Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: справочное пособие / Ф.А. Шевелев, А.Ф. Шевелев. М.: Стройиздат, 1984. 116 с.

12. Попов, Д.Н. Гидромеханика: учебник для вузов / Д.Н. Попов, С.С. Панайотти, М.В. Рябинин. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 364 с.

13. Гиргидов, А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) / А.Д. Гиргидов. СПб.: СПбГПУ, 2007. 546 с.

14. Лепешкин, А.В. Гидравлика и гидропневмопривод. Ч. 2. Гидравлические машины и гидропневмопривод / А.В. Лепешкин, А.А. Михайлин, А.А. Шейпак; под ред. А.А. Шейпака. М.: МГИУ, 2003. 352 с.

15. Шейпак, А.А. Гидравлика и гидропневмопривод. Ч. 1. Основы механики жидкости и газа / А.А. Шейпак. М.: МГИУ, 2003. 192 с.

Михаил Александрович Скоробогатов
Евгений Николаевич Коноплев
Феликс Вячеславович Качановский
Николай Павлович Курбатов
Светлана Степановна Посадкова
Анастасия Александровна Андрианова

РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Учебное пособие

Редактор Ю.А. Якушева
Корректор Я.А. Петрова
Технический редактор Ю.Ф. Воробьева

Подписано в печать 11.09.2019

Формат 60x84 1/16

Физ. печ. л. 14

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 13,02

Заказ № 49

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 6,3

С – 49

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22