

Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.»

Кафедра «Технология и оборудование химических, нефтегазовых
и пищевых производств»

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Методические указания к практическим занятиям
для студентов направлений

15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
21.03.01 «Нефтегазовое дело»

всех форм обучения

Энгельс 2024

ГИДРОСТАТИКА

Основные физические свойства жидкости

Плотность ρ — это масса единицы объёма жидкости ($\text{кг}/\text{м}^3$)

$$\rho = m / V_0 , \quad (1)$$

где m — масса жидкости, кг ; V_0 — объём жидкости, м^3 .

Плотность воды при температуре $+4^\circ\text{C}$ минимальная и равна $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Удельный вес γ — это вес единицы объёма жидкости ($\text{Н}/\text{м}^3$)

$$\gamma = G / V_0 , \quad (2)$$

где G — вес жидкости (сила тяжести), Н ; V_0 — объём жидкости, м^3 .

Связаны удельный вес и плотность через ускорение свободного падения ($g = 9,81 \approx 10 \text{ м}/\text{с}^2$) так:

$$\gamma = \rho g . \quad (3)$$

С увеличением температуры удельный вес жидкости уменьшается.

Сжимаемость - свойство жидкости изменять свой объём под действием давления. Сжимаемость жидкости характеризуется коэффициентом объёмного сжатия, который определяется по формуле

$$\beta_v = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dP} , (\text{м}^2/\text{Н}) \quad (4)$$

где V - первоначальный объём жидкости,

dV - изменение этого объёма, при увеличении давления на величину dP .

Величина обратная β_v называется модулем объёмной упругости жидкости:

$$K = \frac{1}{\beta_v} , (\text{Н}/\text{м}^2) \quad (5)$$

Модуль объёмной упругости не постоянен и зависит от давления и температуры. При гидравлических расчетах сжимаемостью жидкости обычно пренебрегают и считают жидкости практически несжимаемыми. Сжатие жидкостей в основном обусловлено сжатием растворенного в них газа.

Сжимаемость понижает жесткость гидропривода, т.к., на сжатие затрачивается энергия. Сжимаемость может явиться причиной возникновения автоколебаний в гидросистеме, создает запаздывание в срабатывании гидроаппаратуры и исполнительных механизмах.

Иногда сжимаемость жидкостей полезна - ее используют в гидравлических амортизаторах и пружинах.

Температурное расширение - относительное изменение объема жидкости при увеличении температуры на 1°С при $P=const$. Характеризуется коэффициентом температурного расширения

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt}, (1^\circ\text{град (C или K)}) \quad (6)$$

Поскольку для капельных жидкостей коэффициент температурного расширения ничтожно мал, то при практических расчетах его не учитывают.

Вязкость жидкости - свойство жидкости сопротивляться скольжению или сдвигу ее слоев. Суть ее заключается в возникновении внутренней силы трения между движущимися слоями жидкости, которая определяется по формуле Ньютона.

$$T = \pm \mu F \frac{d\omega}{dn}, \quad (7)$$

где n – расстояние по нормали к вектору скорости, μ – коэффициент пропорциональности называется коэффициентом динамической вязкости. «-» - означает что градиент скорости всегда направлен в противоположную сторону переноса количества движения.

$$[\mu] = \left[\frac{Tdn}{F d\omega} \right] = \left[\frac{H \cdot M \cdot C}{M^2 \cdot M} \right] = \left[\frac{H \cdot C}{M^2} \right] = [Pa \cdot c], \quad (8)$$

МПа с = 10^{-3} Па с. $\nu = \mu/\rho$, ν – коэффициент вязкости.

$$\nu = \frac{K2 \cdot M \cdot C \cdot M^3}{C^2 \cdot M^2 \cdot K2} = \frac{M^2}{C}, \quad \nu = M^2/C.$$

τ – касательное напряжение действующее в жидкости.

$$\tau = \frac{T}{F} = \mu \frac{d\omega}{dn} - \text{пропорционально градиенту скорости.}$$

Вязкость жидкости зависит от температуры и от давления.

Понятие гидростатического давления

В результате действия внешних сил (поверхностных и массовых) в жидкости возникают внутренние нормальные напряжения, называемые гидростатическим давлением. Таким образом, гидростатическое давление – это нормальная сила с точностью до бесконечно малых (dR), равномерно распределенная на бесконечно малой площадке (dA):

$$p = \frac{dR}{dA}.$$

Единица измерения давления соответствует размерности напряжения Н/м².

Свойства гидростатического давления

Первое свойство. Давление, как нормальное напряжение, всегда направлено по внутренней нормали к площадке, величина давления является функцией только координат точки и не изменяется во времени:

$$p = f(x, y, z)$$

Второе свойство. Давление в точке жидкости действует по всем направлениям и имеет одинаковую величину.

Основное уравнение гидростатики. Абсолютное, манометрическое, вакуумметрическое давление

Для определения давления в покоящейся жидкости пользуются основным уравнением гидростатики:

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h \quad (8)$$

Давление в любой точке покоящейся жидкости складывается из давления на поверхности жидкости (p_0) и силы тяжести столба жидкости, с основанием, равным единице и высотой, равной глубине погружения точки в жидкость ($\rho \cdot g \cdot h$). Величина $\rho \cdot g \cdot h$ может быть названа весовым давлением, или избыточным давлением жидкости.

Поверхностное давление p_0 может быть обусловлено давлением на поверхности капельной жидкости газа, воздуха или твердого тела, например поршня.

Давление на поверхности жидкости p_0 может быть равным атмосферному давлению, больше атмосферного или недостающим до атмосферного.

Давление, рассчитанное от абсолютного нуля, т.е. с учетом атмосферного давления, называется абсолютным. Так, если в уравнении (8) давление на поверхности жидкости равно атмосферному ($p_0 = p_{атм}$), то давление, рассчитанное по данной формуле можно считать абсолютным:

$$p_{абс} = p_{атм} + \rho \cdot g \cdot h. \quad (9)$$

Если абсолютное давление больше атмосферного, то давление, превышающее атмосферное называется манометрическим, или избыточным. В закрытом резервуаре, при условии, что $p_{абс} > p_{атм}$, величина манометрического давления:

$$p_{ман} = p_{абс} - p_{атм} + \rho \cdot g \cdot h$$

Манометрическое давление в открытом резервуаре на глубине h :

$$p_{ман} = \rho \cdot g \cdot h. \quad (10)$$

Давление, недостающее до атмосферного, называется вакуумметрическим:

$$p_{вак} = p_{атм} - p_{абс}, \quad (11)$$

при условии, что $p_{абс} < p_{атм}$.

При решении задач манометрическое давление учитывается со знаком «+», вакуумметрическое – со знаком «-».

Следует запомнить: чтобы записать абсолютное давление в месте установки манометра, нужно к атмосферному давлению прибавить манометрическое, т.е.

$$p_{абс} = p_{атм} + p_{ман}$$

Чтобы записать абсолютное давление в месте установки вакуумметра, нужно к атмосферному давлению прибавить $p_{вак}$ со знаком минус, т.е.

$$p_{абс} = p_{атм} - p_{вак}$$

Плоскость уровня. Понятие пьезометрической высоты. Эпюры гидростатического давления

При решении задач по определению давления в покоящейся жидкости используют условие равновесия относительно плоскости уровня (плоскости равного давления).

Плоскость уровня – это плоскость с постоянным гидростатическим давлением во всех точках этой плоскости.

Частным случаем плоскости уровня является горизонтальная плоскость в однородной покоящейся жидкости, находящейся в поле действия только сил тяжести.

Пьезометрическая высота или пьезометрический напор – это такая высота столба жидкости, которая своим весовым давлением ($\rho \cdot g \cdot h$) соответствует давлению p в покоящейся жидкости.

Рассмотрим пример представления пьезометрической высоты. Пусть имеем закрытый резервуар, в котором на свободной поверхности действует абсолютное давление, больше атмосферного ($p_{абс} > p_{атм}$) (Рис. 1). На глубине h выведена открытая стеклянная трубка, называемая пьезометром. Если бы резервуар был открыт, уровни жидкости в резервуаре и в пьезометре были бы на одном горизонте (как в сообщающихся сосудах). Поскольку давление на поверхности жидкости в резервуаре больше, чем атмосферное, уровень жидкости в пьезометре будет выше, чем в резервуаре.

Высота, на которую поднимается жидкость в пьезометре, называется пьезометрической высотой и обозначается h_p . Докажем, что пьезометрическая высота h_p соответствует избыточному давлению. Проведем горизонтальную плоскость уровня $0-0$ на глубине h и составим условие равенства давления, рассчитанного слева по пьезометру (p_1) и давления (p_2) справа в баке

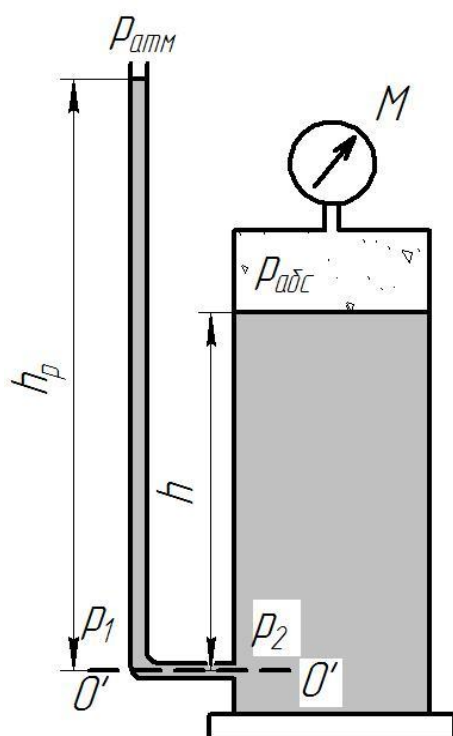


Рис 1. на глубине h :

$$p_1 = p_2$$

Согласно основному уравнению гидростатики (8):

$$p_1 = p_{атм} + \rho \cdot g \cdot h_p \quad p_2 = p_{абс} + \rho \cdot g \cdot h$$

$$p_{атм} + \rho \cdot g \cdot h_p = p_{абс} + \rho \cdot g \cdot h$$

$$h_p = \frac{p_{абс} - p_{атм} + \rho \cdot g \cdot h}{\rho \cdot g} = \frac{p_{изб}}{\rho \cdot g}$$

Условие доказано, таким образом, избыточное давление в любой точке покоящейся жидкости можно заменить давлением столба жидкости в пьезометре. Аналогичные рассуждения можно провести по вакуумметрическому давлению.

Единицы измерения давления

Основной системой единиц измерения давления является система СИ. Но наряду с этой системой при технических расчетах и в производственной практике пользуются технической системой (CGS) и внесистемными единицами измерения.

Система СИ: Н/м² = Па (10³ Па = кПа; 10⁶ Па = МПа; бар = 10⁵ Па).

Техническая система: 1 кгс/см² = 1 ат.

Внесистемные единицы измерения: мм рт. ст.; мм вод. ст.

Перевод единиц давления из ат или Па в высоту столба жидкости и наоборот может быть выполнен по формулам:

$$H = \frac{p}{\rho \cdot g} \quad \text{и} \quad p = \rho \cdot g \cdot H$$

Таблица 1

Соотношение между единицами давления

Единица	Па (Н/м ²)	кгс/см ² (ат)	кгс/м ²	мм вод. ст.	м вод. ст.	мм рт. ст.	бар
1 Па (Н/м ²)	1	10,2· 10 ⁻⁶	0,102	0,102	102·10 ⁻⁶	750·10 ⁻⁵	10 ⁻⁵
1 кгс/см ² (ат)	9,81·10 ⁴	1	10 ⁴	10 ⁻⁴	10	735,6	0,981
1 кгс/м ²	9,81	10 ⁴	1	1	10 ⁻³	73,56·10 ⁻³	98,1·10 ⁻⁶
1 мм вод. ст.	9,81	10 ⁻⁴	1	1	10 ⁻³	73,56·10 ⁻³	98,1·10 ⁻⁶
1 м вод. ст.	9,81·10 ³	0,1			1	73,56	98,1·10 ⁻³
1 мм рт. ст.	133,3	1,36·10 ⁻³	13,6	13,6	13,6·10 ⁻³	1	1,33·10 ⁻³
1 бар	10 ⁵	1,02	10,2·10 ³	10,2·10 ³	10,2	750	1

ПРИМЕР 1.

К резервуару (рис. 2), заполненному бензином плотностью $\rho_{\text{бенз}} = 700 \text{ кг/м}^3$, присоединен U-образный ртутный манометр, показание которого $h_{pm} = 0,1 \text{ м}$; уровень масла над ртутью $h_m = 0,2 \text{ м}$.

Определить абсолютное давление $p_{\text{абс}}$ паров на поверхности бензина и показание пружинного манометра (обозначен буквой М), установленного на крышке резервуара, а также возможную высоту уровня бензина в пьезометре h_p , при условии, что $h = 0,75 \text{ м}$; $a = 0,15 \text{ м}$; $H = 1,1 \text{ м}$. Принять плотность ртути $\rho_{pm} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; плотность масла $\rho_m = 820 \text{ кг/м}^3$.

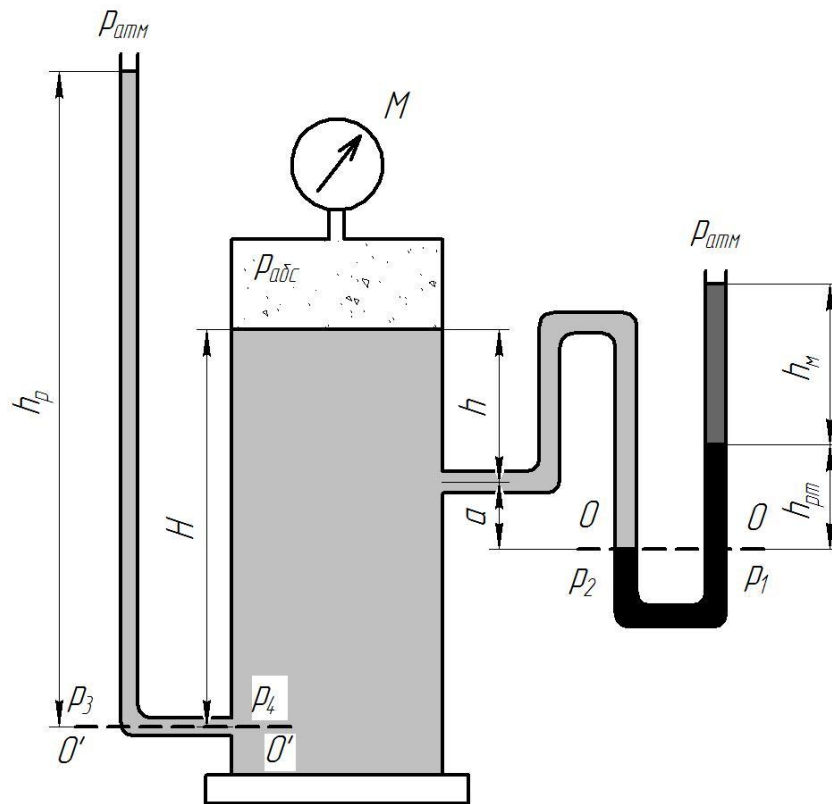


Рис. 2

РЕШЕНИЕ. Решение ведем с учетом атмосферного давления, так как по условию задачи требуется определить абсолютное давление паров бензина.

Для решения задачи воспользуемся понятием плоскости уровня. Выберем плоскость уровня 0-0 на разделе жидкостей бензин-ртуть и составим условие равенства давления, приравняв давления в правом (p_1) и левом колене (p_2) U-образного манометра:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_2 \\ p_1 &= p_{\text{атм}} + \rho_{\text{мас}} \cdot g \cdot h_m + \rho_{pm} \cdot g \cdot h_{pm} \\ p_2 &= p_{\text{абс}} + \rho_{\text{бенз}} \cdot g \cdot (h + a) \end{aligned}$$

Приравняем давление в правом и левом колене U-образного манометра:

$$p_{атм} + \rho_{мас} \cdot g \cdot h_m + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт} = p_{абс} + \rho_{бенз} \cdot g \cdot (h + a),$$

отсюда абсолютное давление паров бензина:

$$p_{абс} = p_{атм} + \rho_{мас} \cdot g \cdot h_m + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт} - \rho_{бенз} \cdot g \cdot (h + a).$$

Принимая атмосферное давление $p_{атм} = 98 \cdot 10^3 \text{ Па} = 98 \text{ кПа}$, получим:

$$p_{абс} = 98 \cdot 10^3 + 820 \cdot 9,8 \cdot 0,2 + 13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,1 - 700 \cdot 9,8 \cdot (0,75 + 0,15) = 106,76 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

Показание манометра, установленного на крышке бака можно определить так:

$$p_{ман} = p_{абс} - p_{атм} = \rho_{мас} \cdot g \cdot h_m + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт} - \rho_{бенз} \cdot g \cdot (h + a) = 8,76 \text{ кПа}$$

Для определения возможной высоты бензина в пьезометрической трубке h_p составим условие равновесия жидкости относительно плоскости уровня 0'-0', в этом случае расчеты можно вести по избыточному (манометрическому) давлению. Для плоскости 0'-0' запишем равенство давлений $p_3 = p_4$:

$$\rho_{бенз} \cdot g \cdot h_p = p_{ман} + \rho_{бенз} \cdot g \cdot H,$$

отсюда

$$h_p = \frac{p_{ман}}{\rho_{бенз} \cdot g} + H = 2,38 \text{ м.}$$

ОТВЕТ: $p_{абс} = 106,76 \cdot 10^3 \text{ Па}$; $p_{ман} = 8,76 \text{ кПа}$; $h_p = 2,38 \text{ м}$.

Сила давления жидкости на плоские поверхности

В практике гидравлических расчетов часто приходится определять величину и точку приложения силы давления жидкости на плоские стенки различной конфигурации. Такими плоскими стенками, воспринимающими давление жидкости, являются стенки резервуаров, элементы гидротехнических сооружений и др.

Для расчета силы полного или абсолютного давления жидкости на плоскую поверхность пользуются аналитической расчетной зависимостью:

$$R_{полн} = p_C \cdot A \quad (12)$$

Сила полного давления жидкости на плоскую стенку равна произведению площади стенки (A) на полное давление на глубине погружения центра тяжести стенки в жидкость (p_C).

Согласно основному уравнению гидростатики, давление на глубине погружения центра тяжести стенки составит:

$$p_C = p_0 + \rho \cdot g \cdot h_C, \quad (13)$$

где h_C - глубина погружения центра тяжести стенки в жидкость, отсчитанная от свободной поверхности;

ρ - плотность жидкости;

g – ускорение свободного падения.

В формуле (6) давление на поверхности жидкости p_0 может быть атмосферным, манометрическим (избыточным), вакуумметрическим. Формулу (6) с учетом (5) можно записать:

$$R_{полн} = p_0 \cdot A + \rho \cdot g \cdot h_C \cdot A \quad (14)$$

Таким образом, сила полного давления может быть представлена в виде двух составляющих:

сила внешнего, или поверхностного давления:

$$R_0 = p_0 \cdot A \quad (15)$$

сила весового давления жидкости

$$R_{жс} = \rho \cdot g \cdot h_C \cdot A \quad (16)$$

Сила полного давления $R_{полн}$ находится как геометрическая сумма двух параллельных сил R_0 и $R_{жс}$:

$$\vec{R}_{полн} = \vec{R}_0 + \vec{R}_{жс}.$$

Давление на поверхности жидкости, согласно закону Паскаля, передается внутрь жидкости всем точкам без изменения, это значит, что эпюра внешнего давления (p_0) представляет равномерно распределенную прямоугольную нагрузку, а равнодействующая такой нагрузки (R_0) приложена в центре тяжести поверхности стенки, т.е. на глубине h_C .

Составляющая от весового давления жидкости $R_{жс}$ приложена в точке, называемой центром давления.

Центр давления силы $R_{жс}$ всегда располагается ниже центра тяжести стенки. Глубина погружения центра давления (h_D) рассчитывается по формуле:

$$h_D = h_C + \frac{J_C \cdot \sin^2 \alpha}{h_C \cdot A} \quad (17)$$

где $e = \frac{J_C \cdot \sin^2 \alpha}{h_C \cdot A}$ - эксцентриситет центра давления, его величина

соответствует смещению центра давления относительно центра тяжести;

J_C - центральный момент инерции плоской стенки относительно горизонтальной оси;

α - угол наклона плоской стенки к горизонту.

Для определения точки приложения силы полного давления нужно воспользоваться теоремой о моменте равнодействующей: момент равнодействующей относительно какой-либо оси равен сумме моментов ее составляющих относительно той же оси. (см. ПРИМЕР 2.)

ПРИМЕР 2.

В торцевой стенке цистерны, заполненной бензином, предусмотрена плоская круглая крышка диаметром $d = 1,6$ м, укрепленная при помощи болтов. Определить силу давления бензина на крышку и точку приложения силы, если высота уровня бензина над нижней кромкой крышки $H = 2,0$ м. На поверхности бензина действует вакуумметрическое давление $p_{\text{вак}} = 0,2$ ат. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 720$ кг/м³, (Рис. 3)

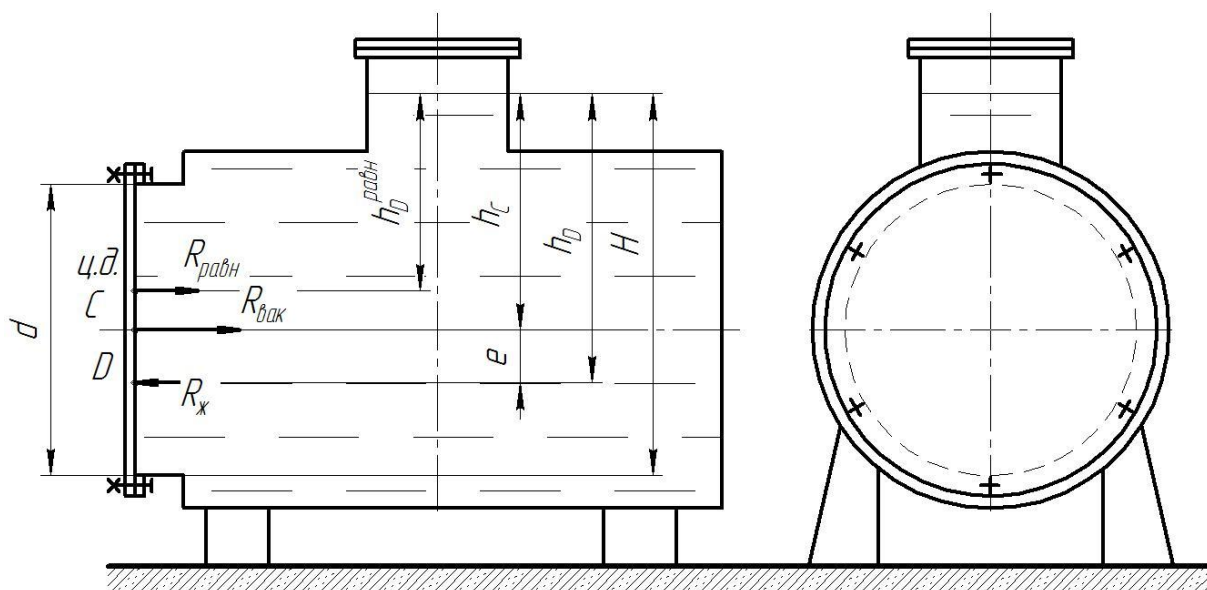


Рис. 3

РЕШЕНИЕ.

Согласно формуле (14) равнодействующая, или сила полного давления составит:

$$R_{\text{равн}} = p_0 \cdot A + \rho \cdot g \cdot h_c \cdot A \text{ или } \vec{R}_{\text{равн}} = \vec{R}_0 + \vec{R}_{\text{ж}}.$$

1. Определим силу от внешнего, вакуумметрического давления:

$$R_0 = R_{\text{вак}} = p_{\text{вак}} \cdot A,$$

где A – площадь крышки; $A = \pi \cdot d^2 / 4 = 3,14 \cdot 1,6^2 / 4 = 2,0$ м².

$$R_{\text{вак}} = 0,2 \cdot 98 \cdot 10^3 \cdot 2,0 = 39,4 \cdot 10^3 \text{ Н} = 39,4 \text{ кН}$$

Покажем линию действия $R_{\text{вак}}$. Эта сила приложена в центре тяжести крышки (т.С) и направлена по нормали внутрь жидкости, как сила отрицательного, вакуумметрического давления.

2. Рассчитаем силу давления бензина на круглую крышку по формуле (16):

$$R_{ж} = \rho \cdot g \cdot h_C \cdot A,$$

где h_C - глубина погружения центра тяжести крышки в жидкость, отсчитанная от свободной поверхности. Определяем h_C по чертежу (рис. 3): $h_C = H - \frac{d}{2} = 1,2$ м.

$$R_{ж} = 720 \cdot 9,8 \cdot 1,2 \cdot 2,0 = 16,9 \cdot 10^3 = 16,9 \text{ кН.}$$

Показываем линию действия силы давления бензина. Сила давления жидкости ($R_{ж}$) приложена в центре давления на глубине h_D и направлена по нормали из жидкости. По формуле (10) глубин погружения центра давления:

$$h_D = h_C + \frac{J_C \cdot \sin^2 \alpha}{h_C \cdot A},$$

где $\alpha = 90^\circ$; $\sin \alpha = 1$ - для вертикальной крышки;

J_C - центральный момент инерции круглой крышки, относительно горизонтальной оси: $J_C = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$.

После подстановки данных в выражение для h_D получим:

$$h_D = h_C + \frac{d^2}{h_C \cdot 16} = 1,2 + 0,13 = 1,33 \text{ м}$$

Эксцентриситет $e = 0,13$ м.

3. Определим величину и положение равнодействующей $\vec{R}_{равн}$ (или силы полного давления) путем векторного сложения сил $\vec{R}_0$ и $\vec{R}_{ж}$:

$$\vec{R}_{равн} = \vec{R}_0 + \vec{R}_{ж};$$

$$R_{равн} = R_0 - R_{ж} = 22,5 \text{ кН.}$$

Положение равнодействующей можно определить, пользуясь теоремой Вариньона: момент от равнодействующей равен сумме моментов составляющих.

Составим сумму моментов сил относительно оси, проходящей по свободно поверхности бензина. Введем обозначение $h_D^{равн}$ глубина погружения центра давления для равнодействующей, тогда

$$M_{R_{равн}} = M_{R_0} + M_{R_{ж}};$$

$$R_{равн} \cdot h_D^{равн} = R_0 \cdot h_C + R_{ж} \cdot h_D,$$

отсюда

$$h_D^{равн} = \frac{R_0 \cdot h_C + R_{ж} \cdot h_D}{R_{равн}}$$

После подстановки численных значений $h_D^{равн} = 1,1$ м. Покажем положение равнодействующей силы давления на чертеже на глубине $h_D^{равн}$ направленную по нормали внутрь жидкости.

ОТВЕТ: $R_{равн} = 22,5$ кН, $h_D^{равн} = 1,1$ м.

Задачи:

Задание 1. Определить плотность жидкости ρ , полученную смешиванием двух жидкостей объемами V_1 и V_2 , имеющими плотности соответственно ρ_1 и ρ_2 .

Вари- ант	ρ_1	ρ_2	V_1	V_2
	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	л	л
а	810	900	20	100
б	820	910	30	120
в	830	920	40	140
г	840	930	50	160
д	850	940	60	180

Задание 2. Кинематический коэффициент вязкости жидкости равен ν . Определить ее динамический коэффициент вязкости, если удельный вес жидкости равен γ .

Вари- ант	ν	γ
	сСт	$\frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$
а	25	7,0
б	30	7,5
в	35	8,0
г	40	8,5
д	45	9,0

Задание 3. Емкость массой m и объемом V заполняется жидкостью. Чему равен вес емкости с жидкостью? (Плотность материала емкости $\rho_m = 7800$ кг/м³)

Вари- ант	m	V	Рабочая жидкость
	кг	л	-
а	20	100	Масло со- ляровое
б	30	150	Нефть
в	40	200	Воздух
г	50	250	Мазут жидкий
д	60	300	Керосин

Задание 4. Определить, на сколько уменьшится давление жидкости в закрытом объеме V_0 гидропривода, если утечки жидкости составили ΔV , а модуль объемной упругости жидкости равен E . Деформацией объемного гидропривода пренебречь.

Вариант	V_0	ΔV	E
	л	л	МПа
а	50	0,1	1500
б	100	0,25	1200
в	125	0,5	1100
г	150	0,75	1000
д	175	1	1200

Задание 5. Емкость объемом V_0 заполнена жидкостью и закрыта герметически. Коэффициент температурного расширения жидкости β_t , модуль объемной упругости жидкости E . Определить повышение давления в емкости при увеличении температуры на величину Δt . Объемной деформацией элементов конструкции емкости пренебречь.

Вариант	β_t	V_0	Δt
	$1/^\circ\text{C}$	л	$^\circ\text{C}$
а	0,0006	50	50
б	0,0007	100	55
в	0,0008	125	60
г	0,0009	150	65
д	0,0010	175	70

Задание 6. Канистра объемом V_0 , наполненная жидкостью и не содержащая воздуха, нагрелась на солнце до температуры t . На сколько повысилось бы давление внутри канистры, если бы она была абсолютно жесткой? Начальная температура жидкости t_0 . Модуль объемной упругости бензина принять равным E , коэффициент температурного расширения β_t .

Вариант	V_0	t	t_0	E	β_t
	л	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	МПа	$1/^\circ\text{C}$
а	20	50	15	1300	0,0008
б	30	55	20	1400	0,0009
в	40	60	25	1500	0,0010
г	50	65	30	1600	0,0011
д	60	70	35	2000	0,0012

Задание 7. При гидравлическом испытании трубопровода диаметром d и длиной l давление в трубопроводе было принято до значения p_1 . Через час давление вследствие утечек понизилось до значения p_2 . Определить,

пренебрегая деформацией трубы, объем утечек жидкости. Модуль объемной упругости жидкости E .

Вари- ант	d м	l м	p_1 МПа	p_2 МПа	E МПа
а	0,25	0,5	5,0	4,75	2000
б	0,30	1,0	5,5	5,0	1400
в	0,35	1,5	6,0	5,75	1200
г	0,40	2,0	6,5	6,15	1100
д	0,45	2,5	7,0	6,80	1000

Задание 8. В отопительный котел поступает объем воды V_0 при температуре t_0 . Какой объем V_1 будет выходить из котла при нагреве воды до температуры t_1 ? Коэффициент β_t задан.

Вари- ант	V_0 м ³	t_0 °C	t_1 °C	β_t 1/°C
а	20	15	70	0,00015
б	30	20	75	0,00016
в	40	25	80	0,00017
г	50	30	85	0,00018

Задание 9. Трубопровод диаметром d и длиной L заполнили водой при атмосферном давлении. Определить, какой объем воды необходимо добавить в трубопровод, чтобы давление в нем повысилось до давления p ? Деформацией стенок трубопровода пренебречь.

Вари- ант	d мм	L км	p ат
а	250	1	70
б	300	1,5	71
в	350	2,0	72
г	400	2,5	73
д	450	3,0	75

Задание 10. Определить плотность нефти и ее удельный вес, если ее масса помещается в заданном объеме.

Вари- ант	$m_{\text{неф}}$ кг	V м ³
а	320000	380
б	330000	385
в	340000	390
г	350000	395
д	360000	400

Задание 11. Нефть весом G занимает объем V . Определить плотность

и удельный вес этой плотности в трех системах единиц.

Вари- ант	G	V
	кгс	см ³
а	90	100000
б	100	200000
в	110	300000
г	120	400000
д	130	500000

Задание 12. Определить объем, удельный объем, занимаемый жидкостью массой m .

Вари- ант	m	Рабочая жидкость
	кг	-
а	125000	Масло соляровое
б	130000	Нефть
в	135000	Воздух
г	140000	Мазут жидкий
д	150000	Керосин

Задание 13. Определить потребное число бочек (баллонов для газа) объемом V для транспортировки жидкости весом G .

Вари- ант	G	V	Рабочая жид- кость
	кН	л	-
а	117	200	Мазут жидкий
б	120	150	Бензин
в	125	50	Углекислый газ
г	130	250	Спирт этило- вый
д	140	100	Масло соля- ровое

Задание 14. Сосуд, объем которого V , заполнен жидкостью. На сколько уменьшится и чему станет равным объем жидкости при увеличении давления на величину Δp ? Модуль объемной упругости жидкости принять равным E .

Ва- ри- ант	V	Δp	E
	л	кПа	МПа
а	10	20000	1962
б	15	30000	2000
в	20	40000	2100
г	25	50000	2200
д	30	60000	2300

Задание 15. В резервуар залит объем жидкости V_1 плотностью ρ_1 . Сколько необходимо долить такой же жидкости, но плотностью ρ_2 , чтобы в резервуаре образовалась смесь плотностью $\rho_{см}$, а также определить удельный объем жидкости.

Вари- ант	V_1	ρ_1	ρ_2	$\rho_{см}$
	м ³	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
а	50	800	824	816
б	20	850	830	834
в	25	900	945	934
г	30	950	970	966
д	40	1000	1030	1016

Задание 16. Стальной толстостенный баллон, объем которого равен V , заполнен нефтью и плотно закрыт при атмосферном давлении. Какое количество нефти необходимо закачать в баллон дополнительно, чтобы давление в нем повысилось в 25 раз? Модуль объемной упругости нефти равен $E=1280$ МПа. Деформацией стенок баллона пренебречь.

Вари- ант	V
	дм ³
а	36
б	40
в	45
г	50
д	56

Задание 17. Резервуар диаметром d и высотой h имеет массу m . Определить вес резервуара G , заполненного водой.

Вари- ант	d	h	m
	мм	м	кг
а	700	1,2	10
б	725	1,4	20
в	750	1,6	30
г	775	1,8	40
д	790	2,0	50

Задание 18. Кинематическая вязкость воды при температуре t_1 равна ν . Определить динамическую вязкость воды. Как изменится вязкость воды при подогреве ее до t_2 ?

Вари- ант	t_1	ν	t_2
	$^{\circ}\text{C}$	Ст	$^{\circ}\text{C}$
а	15	0,0115	60
б	20	0,0120	65
в	25	0,0125	70
г	30	0,0130	75
д	35	0,0135	80

Задание 19. В гидромотор ежеминутно поступает объем V минерального масла, температура которого t $^{\circ}\text{C}$. Отработанное масло, сливаемое из гидромотора, имеет температуру t_1 $^{\circ}\text{C}$. Принять температурный коэффициент объемного расширения β_t . Определить, какой объем масла ежеминутно сливается из гидромотора.

Вари- ант	V	t	t_1	β_t
	м^3	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$1/^{\circ}\text{C}$
а	0,5	30	50	0,0007
б	0,75	35	55	0,0008
в	1,0	40	60	0,0009
г	1,25	45	65	0,0010
д	1,5	55	70	0,0015

Задание 20. Определить удельный объем и удельный вес жидкости.

Вари- ант	Рабочая жид- кость
	-
а	Ртуть
б	Битум
в	Керосин
г	Воздух
д	Бензин

Задание 21. Баллон объемом V_0 , заполненный сжиженным газом,

нагрелся на солнце до температуры t . На сколько повысилось бы давление газа внутри баллона, если бы он был абсолютно жесткий? Начальная температура t_0 . Модуль объемной упругости газа принять равным E , коэффициент температурного расширения β_t .

Вариант	V_0 л	t °C	t_0 °C	E МПа	β_t 1/°C
а	20	50	15	1300	0,0008
б	30	55	20	1400	0,0009
в	40	60	25	1500	0,0010
г	50	65	30	1600	0,0011
д	60	70	35	2000	0,0012

Задание 22. Определить коэффициент динамической вязкости нефти, если коэффициент кинематической вязкости составляет $0,624 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. Плотность нефти 750 кг/м^3 .

Задание 23. Определить массу воды в пожарном рукаве диаметром 51 мм и длиной 20 м.

Задание 24. В отопительной системе (котел, радиаторы, трубопроводы) частного дома содержится $V = 0,3 \text{ м}^3$ воды. Сколько воды дополнительно войдет в расширительный бак при нагревании от 20 до 80°C.

Задание 25. Максимальная высота заполнения цилиндрического вертикального резервуара мазутом $H = 5 \text{ м}$, его диаметр $D = 3 \text{ м}$. Определить массу мазута, которую можно налить в резервуар, если его температура может подняться до $t_1 = 40 \text{ °C}$. Плотность мазута при температуре $t_0 = 15 \text{ °C}$ $\rho_0 = 920 \text{ кг/м}^3$. Деформацией материала стенок резервуара можно пренебречь. Коэффициент температурного расширения мазута $\beta_t = 0,0008 \text{ 1/°C}$.

Задание 26. Водолазы при подъеме затонувших судов работали в море на глубине 50 м. Определить давление воды на этой глубине и силу давления на скафандр водолаза, если площадь его поверхности равна $2,5 \text{ м}^2$. Атмосферное давление считать нормальным (1013 гПа).

Задание 27. Определить давление в резервуаре p_0 и высоту подъема уровня воды h_1 в трубке 1, если показания ртутного манометра $h_2 = 0,15 \text{ м}$ и $h_3 = 0,8 \text{ м}$. (рис. 4)

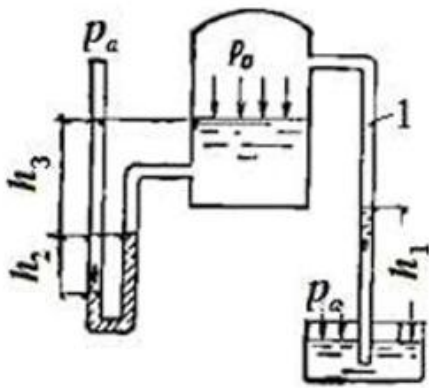


Рис. 4

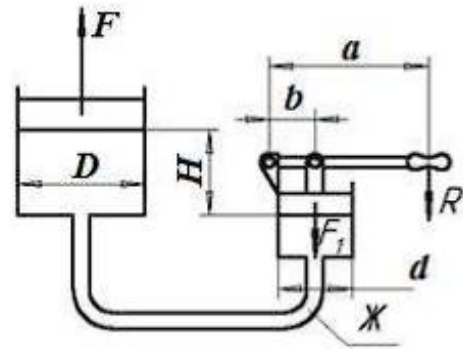


Рис. 5

Задание 28. Определить силу прессования, развиваемую гидравлическим прессом, у которого диаметр большего плунжера 500мм, меньшего 50мм, высота $H=1$ м. Рабочая жидкость с плотностью $\rho=850\text{кг/м}^3$. К рычагу приложено усилие $R=250\text{Н}$. Отношение плеч рычага равно $a/b=12$. (рис. 5)

Задание 29. Две вертикальные трубы центрального отопления соединены горизонтальным участком, на котором установлена задвижка диаметром 0,2 м. Температура воды в правой вертикальной трубе 80°C , а в левой 20°C . Найти разность сил суммарного давления на задвижку справа $F_{\text{пр}}$ и слева $F_{\text{л}}$. Высота воды в вертикальных трубах над уровнем горизонтальной трубы $h=20$ м. (рис. 6)

Задание 30. Два горизонтальных цилиндрических трубопровода содержат минеральное масло, плотностью 900 кг/м^3 и воду, плотностью 1000 кг/м^3 . Высоты составляют: $h_{\text{м}}=0,2$ м; $h_{\text{рт}}=0,4$ м, $h_{\text{в}}=0,9$ м. Зная, что гидростатическое давление на оси в трубопроводе А равно $0,6 \cdot 10^5$ Па, определить давление на оси трубопровода В. (рис. 7)

Задание 31. Несмешивающиеся жидкости, плотностями $\rho_1=1000\text{ кг/м}^3$, $\rho_2=850\text{ кг/м}^3$, $\rho_3=760\text{ кг/м}^3$ находятся в сосуде. Определить избыточное давление на основание сосуда, если высоты жидкостей составляют $h_1=1$ м, $h_2=3$ м, $h_3=6$ м.

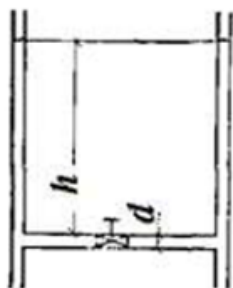


Рис. 6

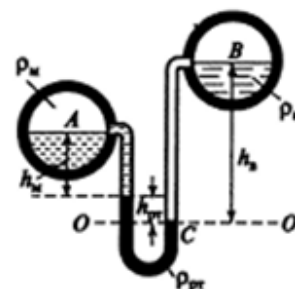


Рис. 7

Задание 32. Цилиндр, диаметром $d = 20$ см, заполнен водой и закрыт сверху без зазора плавающим поршнем, на который положен груз, массой 5 кг. На какую высоту поднимется вода в пьезометре, соединенным с поршнем?

Задание 33. Каково давление на дне озера глубиной 5 м? Атмосферное давление принять равным 100 кПа.

Задание 34. Определить абсолютное и избыточное давление на дне океана, глубина которого H , приняв плотность морской воды ρ , считая ее несжимаемой.

Вари- ант	H	ρ
	км	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
а	5	1030
б	7	1000
в	9	900
г	11	950
д	15	960

Задание 35. Закрытый сосуд наполнен жидкостью. Уровень жидкости в сосуде h , а поверхностное давление равно p . Определить давление на дно сосуда.

Вари- ант	Жидкость	h	p
	-	м	$\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$
а	Керосин	5	3
б	Нефть	5,5	5
в	Ртуть	2	7
г	Бензин	1,5	10
д	Масло со- ляровое	3	15

Задание 36. Найти давление на свободной поверхности воды p_0 в замкнутом резервуаре, если уровень жидкости в открытом пьезометре выше уровня жидкости в резервуаре на h .

Вари- ант	h
	м
а	2,0
б	2,0
в	2,4
г	2,6
д	2,8

Задание 37. Резервуар с квадратным дном со стороной L ,

вертикальными стенами вкопан в землю на всю высоту. Уровень грунтовых вод расположен на глубине h от поверхности. Вес резервуара G . Проверить резервуар на всплытие.

Вари- ант	L	G	h
	м	кгс	м
а	1	100	1
б	2	200	2
в	3	300	3
г	4	400	4
д	5	500	5

Задание 38. Найти величину и направление силы гидростатического давления на 1 погонный метр ширины секторного затвора радиусом R , если задан угол α .

Вари- ант	R	α
	м	град
а	2,5	60
б	3,0	60
в	3,5	60
г	4,0	60
д	5,0	60

Задание 39. U-образный ртутный манометр подключен к резервуару, заполненному водой (рис. 8). Определить давление на поверхности воды в резервуаре p_0 , если заданы h_1 , h_2 , p_a .

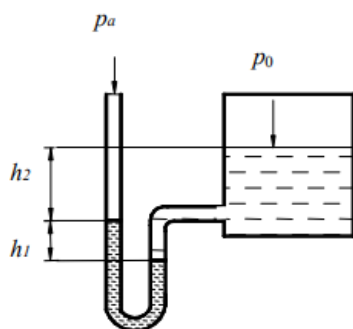


Рис. 8

Вари- ант	h_1	h_2	p_a
	мм	мм	кПа
а	150	250	100
б	175	260	120
в	190	270	100
г	200	280	110
д	210	290	115

Задание 40. Вычислить избыточное давление на забое скважины глубиной h , заполненной глинистым раствором удельным весом γ .

Вари- ант	h	γ
	м	$\frac{\text{кгс}}{\text{м}^3}$
а	1200	1200
б	1300	1300
в	1400	1400
г	1500	1500
д	1600	1600

Задание 41. Вычислить избыточное гидростатическое давление на забое скважины, в которой имеется столб воды высотой h_v , а поверх него столб нефти высотой h_n . Плотность нефти принять равной ρ .

Вари- ант	h_v	h_n	ρ
	м	м	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
а	94	46	872
б	100	50	880
в	102	55	890
г	104	60	895
д	106	65	900

Задание 42. Чему равно полное давление в трубе в единицах СИ, если манометр показывает давление p ?

Вари- ант	p
	$\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$
а	2,0
б	4,0
в	5,75
г	8,0
д	10,0

Задание 43. Манометр, установленный на водопроводной трубе, показывает давление p . Какой пьезометрической высоте соответствует это давление?

Вари- ант	p
	$\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$
а	1,5
б	2,0
в	2,5
г	3,0
д	3,5

Задание 44. Тело, погруженное в воду, потеряло $1/8$ своего веса.

Определить плотность тела.

Вари- ант	ΔG
	-
а	1/8
б	2/8
в	3/7
г	5/6
д	1/2

Задание 45. Определить полное гидростатическое давление на дно сосуда, наполненного водой. Сосуд сверху открыт, давление на свободной поверхности атмосферное. Глубина воды в сосуде $h = 0,60$ м.

ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОДИНАМИКИ

Уравнение расхода жидкости. Уравнение Бернулли.

Основными уравнениями, позволяющими определять параметры жидкости в напорных потоках, являются уравнение расхода и уравнение Бернулли.

Уравнение расхода, записанное для сечении 1 и 2 потока несжимаемой жидкости, представляет собой равенство объемных расходов Q_1 и Q_2 и имеет вид:

$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 \quad (18)$$

где v_1 и v_2 - средние скорости в сечениях 1 и 2;

S_1 и S_2 - площади этих сечений.

Отсюда следует, что средние скорости в сечениях одного и того же потока обратно пропорциональны площадям соответствующих сечений.

Уравнение Бернулли также пишется для двух живых сечений того же потока (напр. сечений 1 и 2).

Для идеальной (невязкой) жидкости оно имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} = H \quad (19)$$

Каждый из членов уравнения Бернулли с одной стороны представляет собой некоторую высоту (напор), а с другой стороны является тем или иным видом механической энергии жидкости.

Под удельной энергией жидкости в сечении понимается энергия, отнесенная к единице веса жидкости. Таким образом, в уравнении (19):

z – это нивелирная высота, определяющаяся как расстояние от центра тяжести данного сечения до произвольно выбранной горизонтальной плоскости сравнения, или удельная энергия положения жидкости в сечении;

$\frac{p}{\rho \cdot g}$ - пьезометрическая высота, или удельная энергия давления жидкости;

$z + \frac{p}{\rho \cdot g}$ - гидростатический напор, или удельная потенциальная энергия жидкости в сечении;

$\frac{v^2}{2 \cdot g}$ - скоростной напор, или удельная кинетическая энергия.

$z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} = H$ - полный напор, или полная удельная механическая энергия жидкости в сечении данного потока, т.е. полный запас механической энергии, которым обладает единица веса жидкости в этом сечении.

Таким образом, энергетический смысл уравнения Бернулли для идеальной жидкости заключается в постоянстве полной удельной механической энергии вдоль данного потока.

Это уравнение, следовательно, выражает собой закон сохранения механической энергии в потоке движущейся идеальной жидкости. При этом различные виды удельной энергии жидкости могут в процессе движения преобразовываться из одного вида в другой, тогда как сумма их остается неизменной. Из уравнения также следует, что потенциальная энергия жидкости, в отличие от твердого тела, состоит из двух слагаемых, соотношение между которыми может изменяться.

Для потока реальной (вязкой) жидкости уравнение Бернулли имеет несколько иной вид в связи с неравномерностью распределения скоростей по сечениям и потерями энергии, а именно:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \sum h_{1-2} \quad (20)$$

где v - средние скорости в соответствующих сечениях;

α - коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей по сечению;

$\sum h_{1-2}$ - суммарная потеря напора (или потеря удельной механической энергии жидкости) между рассматриваемыми сечениями.

Следовательно, для потока реальной (вязкой) жидкости уравнение Бернулли является уравнением Баланса удельной механической энергии жидкости с учетом потерь этой энергии, обусловленных вязкостью жидкости.

Местный полный напор в потоке может быть определен с помощью так называемой трубки полного напора, или трубки Пито, которая

представляет собой трубку, изогнутую под прямым углом и установленную отверстием навстречу потоку (рис. 9.).

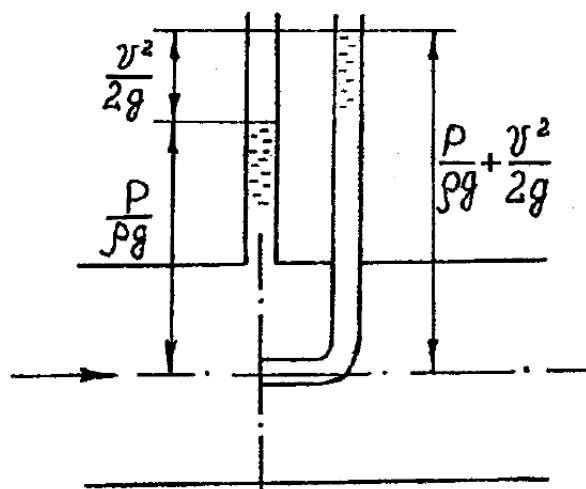


Рис. 9 Способ измерения местного скоростного напора.

Если в том же сечении, где расположено приемное отверстие трубки Пито установить пьезометр, то разность показаний двух трубок будет равна местному скоростному напору.

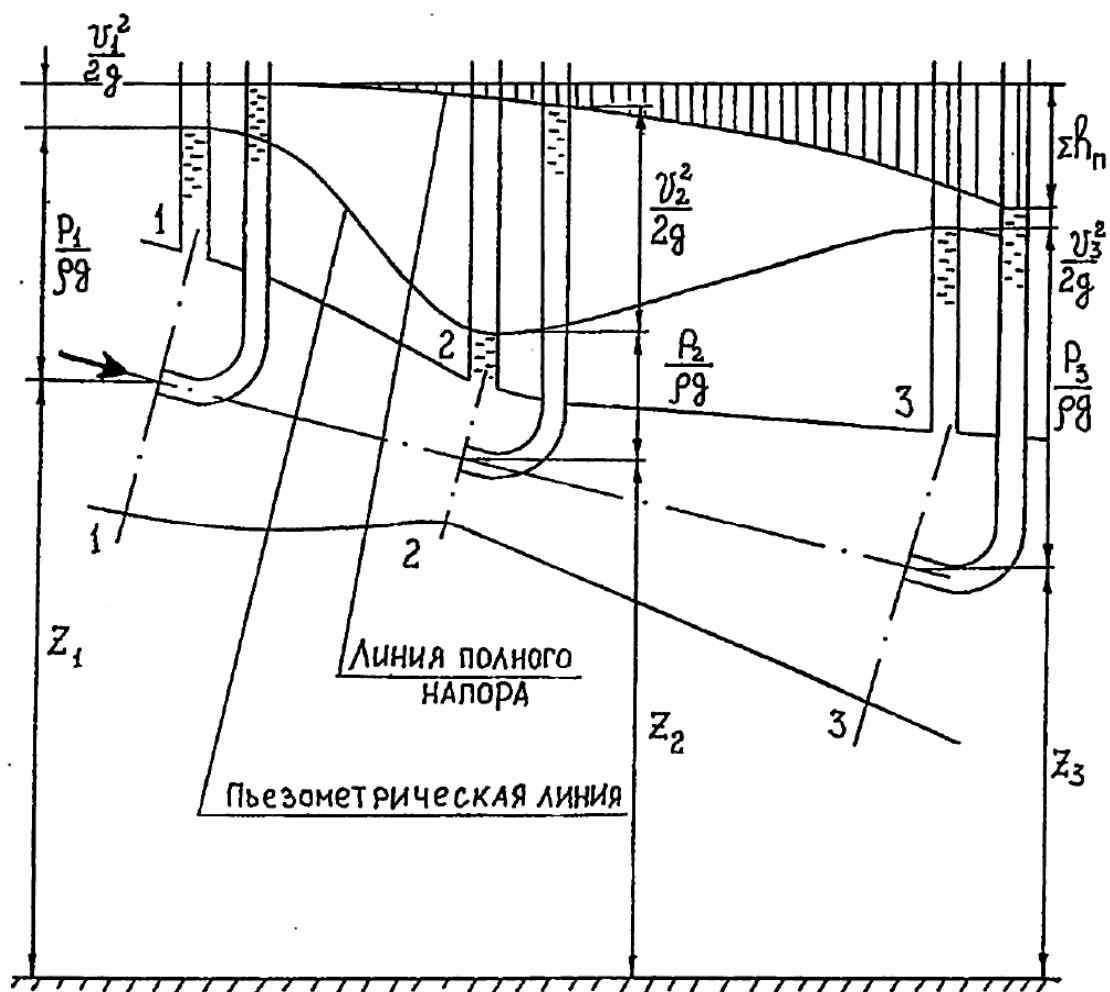


Рис. 10 График, иллюстрирующий уравнение Бернулли

Так как все члены уравнения Бернулли в то же время представляют собой высоты (напоры), то это уравнение наглядно иллюстрируется графиком (см. рис. 10), на котором показаны изменение этих высот вдоль потока.

Кривая изменения пьезометрических высот называется пьезометрической линией; ее можно рассматривать как геометрическое место уровней жидкости в пьезометрах, установленных вдоль потока.

Кривая изменения вдоль потока полного напора называется линией полного напора, под которой можно понимать геометрическое место уровней жидкости в трубках Пито, установленных в центре соответствующих сечений вдоль потока. Для потока вязкой жидкости эта кривая в следствие потерь напора неуклонно спадает.

Расстояние по вертикали между линией полного напора и пьезометрической линией представляет собой местный скоростной напор в данной точке сечения.

Режимы течения жидкости

Возможны два режима течения жидкости в трубах: ламинарный и турбулентный.

Ламинарный режим течения, или просто *ламинарное течение* - это слоистое течение без перемешивания жидкости и без пульсации (колебаний) скоростей и давлений.

В частном случае - при ламинарном течении жидкости в прямой трубе постоянного проходного сечения - все линии тока (траектории частиц) параллельны оси трубы и, следовательно, прямолинейны. В общем же случае ламинарного течения - форма линий тока определяется конфигурацией стенок, ограничивающих поток.

Турбулентное течение - это течение, сопровождающееся перемешиванием жидкости и пульсациями скоростей и давлений. При турбулентном течении движение отдельных частиц является беспорядочным, а их траектории имеют разнообразный вид. Наряду с основным продольным движением частицы жидкости имеют и поперечные перемещения, что и вызывает перемешивание жидкости.

Переход от одного режима течения к другому происходит при определенном соотношении между скоростью течения v , диаметром трубы d и кинематической вязкостью жидкости ν . Это безразмерное соотношение, называемое критическим числом Рейнольдса, определяется по формуле:

$$Re_{кр} = \frac{v_{кр} \cdot d}{\nu}, \quad (21)$$

где $v_{кр}$ - критическая скорость соответствующая критическому числу Рейнольдса.

Численное значение критического числа Рейнольдса для круглых труб не зависит от диаметра трубы и вязкости и примерно равно $Re_{кр} \approx 2300$.

Этот критерий, характеризующий смену режима течения, имеет универсальное значение для всех жидкостей и даже газов.

Число Рейнольдса может быть подсчитано не только по критической, но и по фактической средней скорости ν течения жидкости в данном сечении трубы:

$$Re = \frac{\nu \cdot d}{\nu}, \quad (22)$$

В этом случае оно будет называться фактическим числом Рейнольдса в данном сечении потока.

Условием существования ламинарного режима течения является неравенство:

$$Re \leq Re_{кр} = 2300$$

Это означает, что ламинарный режим имеет место при малых (относительно 2300) числах Рейнольдса, что обычно бывает при малых скоростях, малых диаметрах или больших вязкостях.

При Re , находящемся в диапазоне от 2300 до 4000, имеет место переходная область между ламинарным и турбулентным режимами, или не вполне развитый турбулентный режим.

При $Re > 4000$ режим течения обычно турбулентный.

Физический смысл числа Рейнольдса заключается в том, что это число есть величина пропорциональная отношению сил инерции к силам трения, вызываемым вязкостью. Имеются в виду силы, действующие в потоке жидкости на те или иные ее объемы.

Число Рейнольдса имеет большое значение в гидравлике, так как является основным критерием гидродинамического подобия напорных потоков, т.е. подобия потоков несжимаемой жидкости, которое складывается из геометрического, кинематического и динамического подобия.

Потери напора на трение по длине трубопровода

Так называемые гидравлические потери, т.е. потери полного напора или полной удельной механической энергии, обусловленные вязкостью жидкости, делятся на два вида: потери на трение по длине и местные потери.

Потери на трение по длине, рассматриваемые в данной работе, в чистом виде возникают в прямых трубах постоянного проходного сечения и обусловлены внутренним трением в жидкости. В этом случае скорость несжимаемой жидкости, как это следует из уравнения расхода, остается постоянной во всех сечениях потока вдоль трубы постоянного диаметра. Следовательно уменьшение полной удельной энергии жидкости

происходит за счет уменьшения гидростатического напора (удельной потенциальной энергии) вдоль потока.

Как показывают опыты потери на трение по длине h_{mp} пропорциональны относительной длине трубы l/d и приблизительно пропорциональны квадрату средней скорости (при турбулентном режиме). Поэтому в гидравлике принято эти потери определять по формуле Дарси, которая имеет вид:

$$h_{mp} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (23)$$

где λ - безразмерный коэффициент пропорциональности, получивший название коэффициента сопротивления на трение по длине, или коэффициента Дарси.

При ламинарном режиме течения потеря напора на трение по длине трубы пропорциональна скорости (и расходу) в первой степени и определяется законом Пуазейля, который имеет вид:

$$h_{mp} = \frac{128 \cdot v \cdot l \cdot Q}{\pi \cdot g \cdot d^4} \quad (24)$$

Если же этот закон привести к виду формулы Дарси, то будем иметь:

$$h_{mp} = \lambda_L \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \text{ где } \lambda_L = \frac{64}{Re} \quad (25)$$

При турбулентном режиме течения различают следующие три области сопротивления:

- **первая область** - область гидравлически гладких труб - в ней коэффициент λ_T от шероховатости не зависит, а определяется лишь числом Рейнольдса.

В этой области при расчете λ_T может быть использована известная формула Блазиуса, которая имеет вид:

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (26)$$

- **вторая область** - характеризуется тем, что коэффициент λ_T зависит одновременно как от числа Рейнольдса Re , так и от относительной шероховатости Δ/d .

Наиболее удобной в этом случае формулой, выражающей эту функциональную зависимость при турбулентном режиме течения, является формула Альтшуля, имеющая следующий вид:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25} \quad (27)$$

- **третья область** - область больших Re и Δ/d , где коэффициент λ_T не зависит от числа Re , а определяется лишь относительной шероховатостью Δ/d .

Формула, определяющая величину коэффициента λ_T при этом получается из формулы Альтшуля (27), принимая в ней $Re \rightarrow \infty$.

Определение потерь напора на местных сопротивлениях

Гидравлические потери (потери полного напора, или удельной энергии) могут быть двух видов: потери на трение по длине и местные потери.

Простейшими местными сопротивлениями являются расширение, сужение и поворот русла (трубы). Более сложные сопротивления представляют собой комбинации перечисленных простейших.

Местные потери напора чаще всего пропорциональны квадрату расхода, поэтому их величину принято определять пропорционально скоростному напору по формуле Вейсбаха:

$$h_m = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (28)$$

где: v - средняя по сечению скорость в трубопроводе, в котором установлено данное местное сопротивление, если же трубопровод меняет свое проходное сечение, то скорость необходимо взять в трубопроводе с меньшей площадью сечения;

ζ - безразмерный коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом потерь или коэффициентом сопротивления.

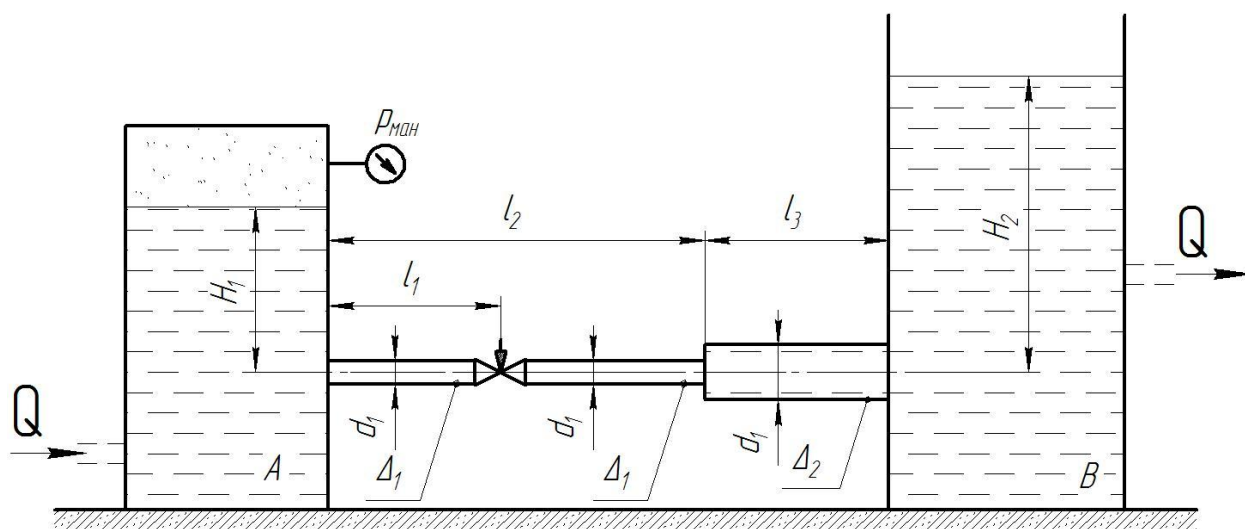
Коэффициент ζ определяется в основном формой местного сопротивления и для данного сопротивления в большинстве случаев является величиной примерно постоянной. Коэффициенты местных сопротивлений для некоторых их видов приведены в приложении 1.

ПРИМЕР: Вода из закрытого резервуара А поступает в открытый резервуар В при пропускной способности системы $Q = 15$ л/с по трубам $d_1 = 75$ мм, $l_1 = 8$ м; $l_2 = 20$ м; $d_2 = 100$ мм и $l_3 = 15$ м. Напоры воды в резервуарах постоянны относительно оси трубы $H_1 = 1,5$ м; $H_2 = 3,5$ м.

Определить показание манометра ($p_{ман}$) на поверхности воды в закрытом резервуаре, а также соответствующий манометрический напор ($H_{ман}$).

Принять абсолютную шероховатость труб: $\Delta_1 = 0,5$ мм; $\Delta_2 = 0,2$ мм. Учесть местные сопротивления в системе: на входе в первую трубу, в пробковом кране при угле закрытия $\alpha = 30^\circ$; при внезапном расширении и на выходе из второй трубы.

Движение воды в системе считать установившимся, т.е. $Q = \text{const}$. Построить линию полного напора (напорную линию), пьезометрическую линию, показать эпюру потерь напора.



Методические указания к решению задачи

1. Определение скоростей движения жидкости в трубопроводах

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}$$

2. Определение скоростных напоров в трубопроводах

$$h_v = \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

3. Расчет потерь напора в местных сопротивлениях (по табл. 1 приложения)

4. Определение потерь напора по длине

- 4.1. Расчет числа Рейнольдса для каждой трубы

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

- 4.2. Расчет граничных значений для чисел Рейнольдса (для определения области сопротивления для обеих труб)

- 4.3. Расчет коэффициентов сопротивления и потерь напора на каждом участке (по табл.1).

Табл. 1

Диапазоны чисел Рейнольдса	Формула для расчета
Потоки в гидравлически гладких трубах $2300 \leq Re \leq 20 \cdot \frac{d}{\Delta_s}$	$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$
Потоки с доквадратическим сопротивлением $20 \cdot \frac{d}{\Delta_s} \leq Re \leq 500 \cdot \frac{d}{\Delta_s}$	$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_s}{d} \right)^{0,25}$

Потоки с квадратическим сопротивлением $\text{Re} \geq 500 \cdot \frac{d}{\Delta_9}$	$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta_9}{d} \right)^{0,25}$
--	---

4.4. Определения общих потерь напора в трубопроводе

$$h_{mp} = \sum h_{\text{дл}} + \sum h_{\text{м}}$$

5. Расчет манометрического напора и манометрического давления в резервуаре А. В соответствии с уравнением Бернулли:

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

где

$$z_1 = H_1; \quad z_2 = H_2;$$

$$p_1 = p_{\text{атм}} + p_{\text{ман}}; \quad p_2 = p_{\text{атм}};$$

$$v_1 = 0; \quad v_2 = 0$$

$$H_1 + \frac{p_{\text{ман}}}{\rho \cdot g} = H_2 + h_{mp},$$

отсюда искомый манометрический напор составит:

$$H_{\text{ман}} = \frac{p_{\text{ман}}}{\rho \cdot g} = H_2 - H_1 + h_{mp}$$

манометрическое давление:

$$p_{\text{ман}} = \rho \cdot g \cdot H_{\text{ман}}$$

Пример построения линий пьезометрического, полного напора и эпюры потерь давления показан на рис. 11.

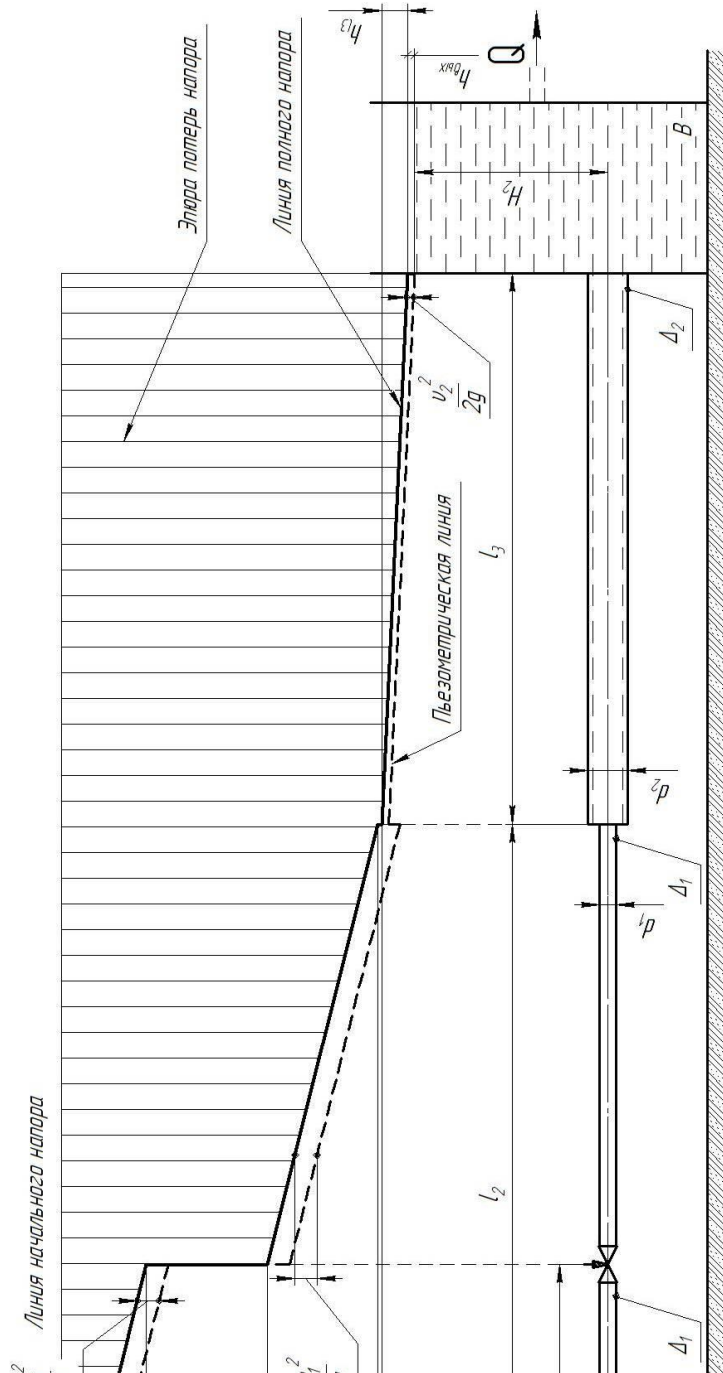


Рис. 11 Пример построения линий полного напора, пьезометрической линии, эпюры потерь напора

Задачи:

Задание 1. По трубе диаметром $d = 20$ см под напором движется минеральное масло с температурой $t = 30$ °С. Определить критическую скорость и расход, при котором происходит смена режимов движения жидкости. Кинематический коэффициент вязкости равен 1 Ст.

Задание 2. На трубопроводе имеется переход с диаметра 50 мм на диаметр 100 мм. По трубопроводу движется вода температурой 26 °С. Скорость воды в узком сечении 2,5 м/с. Определить объемный и массовый расходы воды.

Задание 3. На трубопроводе имеется переход с диаметра 80 мм на диаметр 50 мм. По трубопроводу движется вода температурой 20 °С. Скорость воды в узком сечении 1,8 м/с. Определить скорость воды в широком сечении и сделать вывод о режимах движения в узком и широком сечениях.

Задание 4. Труба, по которой течет вода, имеет переменное сечение. Определить скорость во втором сечении, если скорость в первом сечении $v_1 = 0,05$ м/с; $d_1 = 0,2$ м; $d_2 = 0,1$ м.

Задание 5. По трубопроводу диаметром $d = 150$ мм перекачивается нефть плотностью $\rho = 800$ кг/м³ в количестве 1200 т. в сутки. Определить секундный объемный расход нефти Q и среднюю скорость ее течения v .

Задание 6. По полностью затопленному трубопроводу перекачивается жидкость со скоростью $v = 0,2$ м/с. Определить расход жидкости Q , если гидравлический радиус $R = 0,015$ м.

Задание 7. Трубопровод состоит из трех последовательно соединенных участков труб, внутренние диаметры которых d_1 , d_2 , d_3 . Определить средние скорости жидкости на участках, если объемный расход в трубопроводе Q .

Вари- ант	d_1	d_2	d_3	Q
	мм	мм	мм	л/мин
а	51	76	82	48
б	54	80	83	50
в	56	82	84	52
г	60	84	85	54
д	63	86	86	56

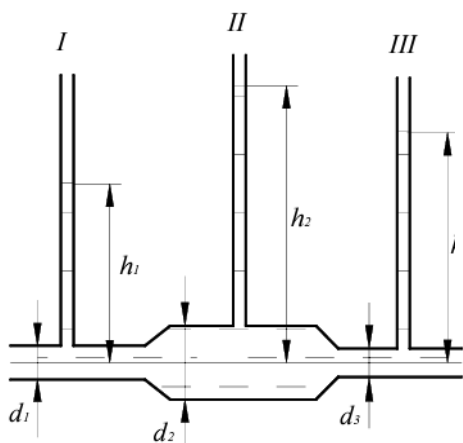
Задание 8. Вычислить потерю напора в трубопроводе внутренним диаметром d , длиной L при перекачке нефти с кинематической вязкостью ν и скоростью движения v .

Вари- ант	d	L	ν	ν
	мм	мм	м/с	Ст
а	50	100	0,3	0,2
б	52	200	0,5	0,3
в	54	300	0,7	0,4
г	56	400	0,9	0,5
д	58	500	1,1	0,6

Задание 9. Нефть с кинематической вязкостью ν движется по трубопроводу. Определить минимальный диаметр трубопровода d , при котором нефть будет двигаться при ламинарном режиме с расходом Q .

Вари- ант	ν	Q
	$\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	л/с
а	0,3	8,14
б	0,4	9,14
в	0,5	10,14
г	0,6	11,14
д	0,7	12,0

Задание 10. Горизонтальный трубопровод составлен из трех участков различных диаметров d_1 , d_2 , d_3 (рис. 12). Высота уровней в пьезометрических трубках I и II при движении жидкости по трубопроводу устанавливается соответственно h_1 , h_2 . Вычислить пьезометрическую высоту h_3 , установившуюся в пьезометре III. Жидкость считать идеальной.



Вари- ант	d_1	d_2	d_3	h_1	h_2
	мм	мм	мм	мм	мм
а	24	56	40	68	84
б	26	58	42	70	86
в	28	60	43	72	88
г	30	62	44	74	90
д	32	64	45	76	92

Рис. 12

Задание 11. Определить расход воды в горизонтальном трубопроводе переменного сечения, скорость на каждом участке и построить пьезометрическую линию, если заданы соответственно H — полный напор, d_1 , $d_2=d_4$, d_3 — диаметры гидролиний.

Вари- ант	H	d_1	d_2	d_3	d_4
	м	мм	мм	мм	мм
а	5	120	60	100	60
б	6	130	65	105	65
в	7	140	70	110	70
г	8	150	80	115	75
д	9	160	85	120	80

Задание 12. Из напорного бака вода течет по трубе диаметром $d_1 = 20$ мм, и затем вытекает в атмосферу через насадок с диаметром выходного отверстия $d_2 = 10$ мм. Избыточное давление воздуха в баке $p_0 = 0,18$ МПа; высота $H = 1,6$ м. Пренебрегая потерями энергии, определить скорости течения воды в трубе v_1 и на выходе из насадка. (рис. 13)

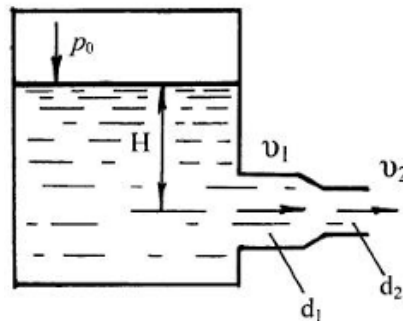


Рис. 13

Задание 13. Определить, на какую высоту поднимется вода в трубке (рис. 14), один конец которой присоединен к суженному сечению трубопровода, а другой конец опущен в воду. Расход воды в трубе $Q = 0,025$ м³/с; избыточное давление $p_1 = 49$ кПа; диаметры $d_1 = 100$ мм и $d_2 = 50$ мм. Потерями напора пренебречь.

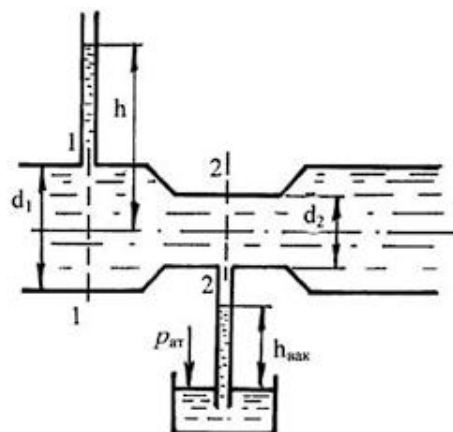


Рис. 14

Задание 14. По трубопроводу диаметром $d = 150$ мм перекачивается нефть плотностью $\rho = 800$ кг/м³ в количестве 1200 т в сутки. Определить

секундный объемный расход нефти Q и среднюю скорость ее течения v .

Задание 15. При прокачке бензина ($\rho = 700 \text{ кг/м}^3$) по трубе длиной $l = 5,5 \text{ м}$ и диаметром $d = 15 \text{ мм}$ падение давления в трубопроводе $\Delta p = 0,11 \text{ МПа}$. Принимая закон сопротивления квадратическим, определить эквивалентную шероховатость трубы Δ , если расход $Q = 0,9 \text{ л/с}$.

Задание 16. Определить коэффициент сопротивления вентиля, установленного в конце трубопровода диаметром $d = 50 \text{ мм}$, если показание манометра перед вентилям $p_{\text{ман}} = 3,7 \text{ кПа}$, а расход воды $Q = 2,5 \text{ л/с}$.

Задание 17. Определить потери напора в системе охлаждения двигателя внутреннего сгорания, включающей в себя центробежный насос, радиатор ($\zeta_1 = 5$), термостат ($\zeta_2 = 3$), трубопроводы ($\zeta_3 = 1,5$) и водяную рубашку двигателя ($\zeta_4 = 4,5$), если расход воды $Q = 4,2 \text{ л/с}$, рис. 8. Все коэффициенты местных сопротивлений отнесены к скорости в трубе диаметром $d = 50 \text{ мм}$. Потерями напора на трение пренебречь. (рис. 15)

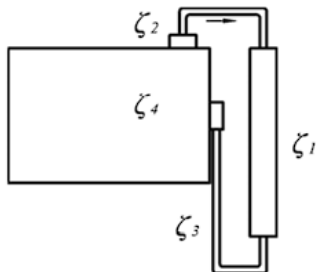


Рис. 15

Задание 18. Определить потери напора на трение в трубопроводе диаметром $d = 250 \text{ мм}$, длиной $l = 1000 \text{ м}$, с абсолютной шероховатостью стен $\Delta = 0,15 \text{ мм}$, служащего для транспортирования нефти с весовым расходом $G = 2 \cdot 10^6 \text{ Н/ч}$, плотностью $\rho = 880 \text{ кг/м}^3$ и коэффициентом кинематической вязкости $\nu = 0,3 \text{ см}^2/\text{с}$.

Задание 19. Горизонтальная труба диаметром $d = 5 \text{ см}$ соединяет резервуары с водой, в которых поддерживаются постоянные уровни $H_1 = 4,5 \text{ м}$, $H_2 = 2,5 \text{ м}$. Для регулирования расхода на трубопроводе установлен вентиль. Определить коэффициент сопротивления вентиля и потерю напора в нем, если расход воды $Q = 12,5 \text{ л/с}$, а избыточное давление на поверхности воды в напорном баке $p_{0и} = 25 \text{ кПа}$. Другими потерями напора пренебречь. (рис. 16)

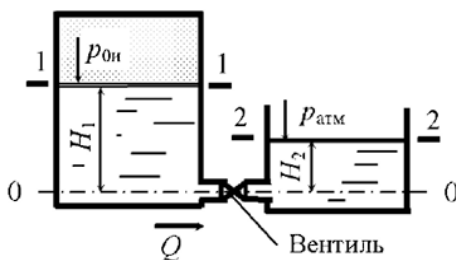


Рис. 16

Задание 20. По горизонтальному трубопроводу длиной $l = 150$ м и диаметром $d = 200$ мм движется жидкость плотностью $\rho = 950$ кг/м³, имеющая кинематический коэффициент вязкости $\nu = 15$ сСт. Трубы бесшовные стальные, бывшие в эксплуатации. Определить среднюю по живому сечению скорость движения жидкости, если перепад давлений в начале и конце участка трубопровода составляет $\Delta p = 12$ кПа. Местные потери напора не учитывать.

Задание 21. Горизонтальная труба (рис. 16) диаметром $d = 45$ мм соединяет резервуары, в которых поддерживаются постоянные уровни $H_1 = 1,3$ м, $H_2 = 0,7$ м. Для регулирования расхода на трубопроводе установлен вентиль. Определить потерю напора на вентиле, если расход воды $Q = 30$ м³/ч, а избыточное давление в напорном баке $p_{0и} = 17$ кПа.

Задание 22. Горизонтальная труба (рис. 16) диаметром $d = 75$ мм соединяет резервуары, в которых поддерживаются постоянные уровни $H_1 = 1,5$ м, $H_2 = 0,5$ м. Для регулирования расхода на трубопроводе установлен вентиль. Определить расход в трубопроводе, если избыточное давление в напорном баке $p_{0и} = 15$ кПа, коэффициент сопротивления вентиле $\xi = 8,5$.

Задание 23. Из открытого резервуара, в котором поддерживается постоянный уровень, по стальному трубопроводу (эквивалентная шероховатость $\Delta_{эkv} = 0,1$ мм), состоящему из труб различного диаметра ($d_1 = 50$ мм, $d_2 = 75$ мм, $d_3 = 50$ мм) и различной длины ($l_1 = 5$ м, $l_2 = 10$ м, $l_3 = 15$ м), в атмосферу вытекает вода, расход которой $Q = 6$ л/с. (рис. 17). Определить скорости движения воды и потери напора (по длине и местные) на каждом участке трубопровода. При определении местных потерь коэффициент местного сопротивления входа принять $\zeta_{вх} = 0,5$, на внезапном сужении $\zeta_{в.с} = 0,38$. Потери на расширение определить по формуле Борда. Кинематический коэффициент вязкости воды $\nu = 0,0101$ см²/с.

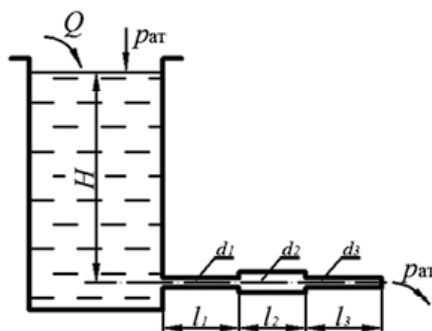


Рис. 17

Задание 24. Определить требуемый диаметр горизонтального трубопровода длиной 186 м, по которому подается 13,5 м³/ч керосина, допустимая потеря напора 17 м, коэффициент трения 0,027.

Задание 25. Из рефлюксной емкости, установленной на высоте 6,3 м

по медному трубопроводу длиной 47 м, диаметром 40 мм, при температуре 40° С, течет 50%-ный глицерин. На трубопроводе располагается три колена с углом поворота 90° и отношением $R_0/d = 4$ и пробковый кран, давление в колонне атмосферное, коэффициент трения предварительно принять равным 0,025. Найти скорость спирта, уточнить значение коэффициента трения. Определить скорость течения глицерина.

Задание 26. По трубопроводу диаметром 38×4 мм при температуре 20 °С перекачивается вода. Расход воды составляет 6 т/ч. Определить коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси), если трубопровод стальной с незначительной коррозией. Определить потери давления и напора на трение, если общая длина трубопровода 20 м.

Задание 27. По трубопроводу диаметром 38×4 мм при температуре 20 °С перекачивается вода. Расход воды составляет 6 т/ч. Определить коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси), если трубопровод стальной с незначительной коррозией. Определить потери давления и напора на местные сопротивления, если трубопроводе установлены: диафрагма (с диаметром отверстия 15,87 мм), колено-угольник (4 шт.), нормальный вентиль, если общая длина трубопровода 20 м.

Задание 28. Определить гидравлическое сопротивление кожухотрубчатого теплообменника при движении через него потока воды. Средняя температура в теплообменнике 60 °С. Массовый расход жидкости 300 т/ч. Диаметр труб 20×2 мм, длина труб 6 м, число труб 1658, число ходов теплообмнника по трубному пространству 2. Трубы стальные с незначительной коррозией.

Задание 29. По горизонтальному трубопроводу длиной 150 м и диаметром $d = 200$ мм движется жидкость плотностью $\rho = 950$ кг/м³, имеющая кинематический коэффициент вязкости $\nu = 15$ сСт. Трубы бесшовные стальные, бывшие в эксплуатации. Определить среднюю по живому сечению скорость движения жидкости, если перепад давлений в начале и конце участка трубопровода составляет $\Delta p = 12$ кПа. Местные потери напора не учитывать.

Гидравлический удар

Гидравлический удар представляет собой явление импульсивного изменения давления, происходящее в напорных трубопроводах.

Например, если резко закрыть водопроводный кран (рис. 18), то вода, движущаяся со скоростью V , вынуждена так же резко остановиться.

Однако из-за наличия инерционных сил движущейся жидкости перед краном возникнет ударное повышение давления величиной Δp , которое начнёт распространяться со скоростью звука $V_{зв}$ в воде в обратную сторону и может привести к авариям на трубопроводах.

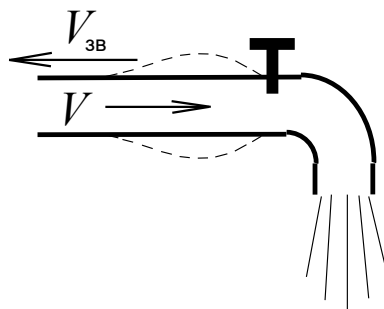


Рис. 18. Гидравлический удар

Величину Δp (Па) при гидравлическом ударе можно рассчитать по формуле Н.Е. Жуковского:

$$\Delta p = \rho \Delta V V_{3B}, \quad (29)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м^3 ; $V_{3B} \approx 1000 \text{ м/с}$.

Покажем на примере, насколько может быть опасен гидравлический удар в водопроводе зданий. При средней скорости движения воды $V = 1 \text{ м/с}$, если мгновенно закрыть кран (см. рис. 18), давление в трубе может повыситься на опасную величину

$$\Delta p = 1000 \cdot 1 \cdot 1000 = 1\,000\,000 \text{ Па} = 1 \text{ МПа} = 100 \text{ м} = 10 \text{ ат}$$

при максимально допустимом давлении не более $0,45 \text{ МПа}$. Поэтому в конструкции кранов предусматривают медленное закрывание для защиты от гидравлического удара.

Гидравлика отверстий и насадков

Насадком называется короткая труба, длиной обычно от 3 до 4 d , улучшающая условия вытекания жидкости. Например, если вода вытекает из бака через отверстие и насадок (рис. 17), которые расположены на одной и той же глубине H и диаметры которых равны, то в насадке расход воды будет примерно на 30 % больше, чем в отверстии.

Расход воды для отверстия или насадка находят по формуле

$$Q = \mu_0 \omega \sqrt{2g\Delta H}, \quad (30)$$

где μ_0 — коэффициент расхода (для круглого отверстия $\mu_0 = 0,62$; для насадка $\mu_0 = 0,82$); ω — площадь поперечного сечения отверстия или насадка; ΔH — разность напоров (см. рис. 19).

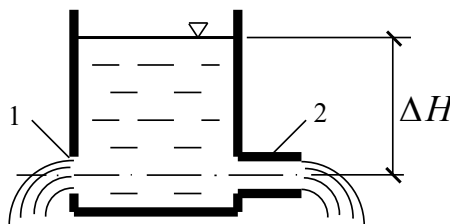


Рис. 19. Истечение из отверстий и насадков:

1 — отверстие; 2 — насадок

Задачи:

Задание 1. Вода вытекает из закрытого резервуара в атмосферу через отверстие диаметром $d = 20$ мм (рис. 20). Глубина погружения центра отверстия $h = 0,45$ м, избыточное давление на поверхности жидкости $p_{0п} = 8,3$ кПа. Определить расход жидкости, а также необходимое избыточное давление для пропуска того же расхода, если к отверстию присоединить цилиндрический внешний насадок длиной $0,1$ м.

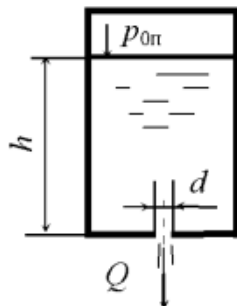


Рис. 20

Задание 2. Открытый призматический резервуар с вертикальными стенками опоражнивается через отверстие диаметром $d = 2,5$ см (рис. 21). Площадь поперечного сечения резервуара $1,2$ м². Через 5 мин напор составил $H_2 = 0,7$ м. Определить расход и дальность полета струи в начальный момент времени, если отверстие расположено на высоте $h = 0,45$ м от пола.

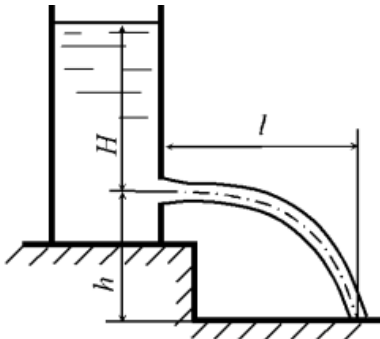


Рис. 21

Задание 3. Жидкость вытекает из закрытого резервуара в атмосферу через отверстие диаметром $d = 25$ мм (рис. 20). Избыточное давление на свободной поверхности жидкости $p_{0п} = 17$ кПа, глубина погружения отверстия $h = 0,6$ м. Определить расход жидкости через отверстие, если относительная плотность жидкости $\delta = 1,12$.

Задание 4. Вода вытекает из открытого резервуара через внешний цилиндрический насадок диаметром $d = 3,2$ см и длиной 16 см в атмосферу (рис. 22) при $h = 55$ см. В резервуар поступает вода с расходом Q . Определить глубину воды в резервуаре, если насадок заменить отверстием того же диаметра.

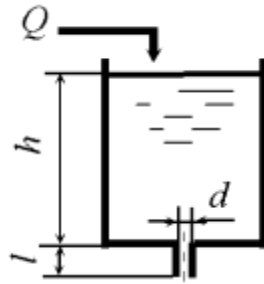


Рис. 22

Задание 5. Вода вытекает в атмосферу через установленный на боковой поверхности закрытого резервуара насадок диаметром $d = 6$ см. Избыточное давление на свободной поверхности жидкости $p_{0и} = 6,1$ кПа, расход жидкости $Q = 5$ л/с, глубина погружения насадка $H = 90$ см. Определить коэффициент расхода насадка.

Задание 6. Определить время полного опорожнения открытого резервуара с постоянной площадью сечения и объемом $V = 50$ л через отверстие в дне при начальном расходе $Q = 1,8$ м³/ч и напоре $H = 0,5$ м.

Задание 7. Жидкость вытекает из закрытого резервуара в атмосферу через внешний цилиндрический насадок диаметром $d = 35$ мм и длиной 170 мм (рис. 23). Избыточное давление на свободной поверхности жидкости $p_{0и} = 15$ кПа, глубина жидкости в резервуаре $h = 0,75$ м. Определить расход жидкости через насадок, если ее относительная плотность $\delta = 0,85$.

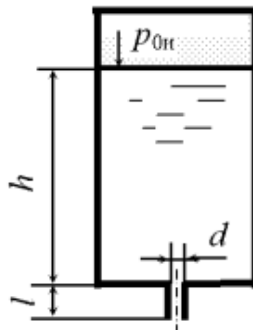


Рис. 23

Задание 8. Жидкость вытекает в атмосферу из открытого резервуара через отверстие в его боковой стенке, при постоянном напоре $H = 7,5$ м. Диаметр отверстия $d = 4,1$ см. В резервуар поступает жидкость с постоянным расходом Q . Определить, какой будет напор, если к отверстию присоединить цилиндрический внешний насадок того же диаметра.

Задание 9. Жидкость вытекает из открытого резервуара в атмосферу (рис. 21) через малое отверстие в тонкой стенке под напором $H = 1,2$ м. Центр отверстия расположен на высоте $h = 50$ см от пола. Какой напор нужно создать, чтобы дальность полета струи осталась прежней, если к отверстию присоединить внешний цилиндрический насадок.

Задание 10. Определить время полного опорожнения открытого бака с вертикальными стенками через внешний цилиндрический насадок

диаметром $d = 5,5$ мм. Площадь бака $2,5 \text{ м}^2$, первоначальный напор $H = 1,5$ м. Насадок длиной 27 мм присоединен к отверстию в дне бака.

Задание 11. Жидкость вытекает из открытого резервуара в атмосферу (рис. 21) через малое отверстие в тонкой стенке под напором $H = 0,8$ м. Центр отверстия расположен на высоте $h = 75$ см от пола. Какой напор нужно создать, чтобы дальность полета струи осталась прежней, если центр отверстия расположить относительно пола на высоте $h = 90$ см.

Задание 12. Определить время наполнения мерного бака объемом $0,02 \text{ м}^3$, если истечение происходит при постоянном уровне воды через внешний цилиндрический насадок диаметром $d = 0,02$ м при избыточном давлении на поверхности воды $p_{0н} = 30 \text{ кПа}$ (рис. 24). Глубина погружения насадка $h = 2,4$ м.

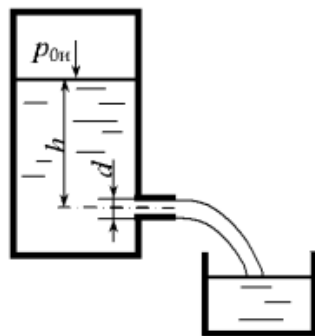


Рис. 24

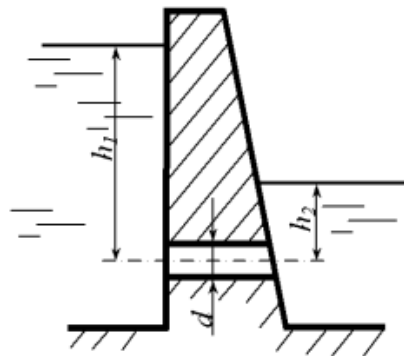


Рис. 25

Задание 13. Через водоспуск плотины, имеющей форму цилиндрического насадка, протекает вода с расходом $Q = 2,3 \text{ м}^3/\text{с}$ при постоянных уровнях (рис. 25). Определить диаметр водоспуска, если $h_1 = 12,0$ м, $h_2 = 2,0$ м.

Задание 14. Через отверстие в тонкой боковой стенке вытекает вода под напором $H = 16$ м. Изменится ли расход, если к отверстию подсоединить внешний цилиндрический насадок с тем же диаметром?

Задание 15. По короткой трубе диаметром $d = 0,10$ м из одного резервуара в другой перетекает бензин ($\rho_б = 800 \text{ кг/м}^3$). Определить начальный расход, если $h_1 = 2,0$ м, $h_2 = 0,5$ м, избыточное давление в одном резервуаре $p_{0н} = 0,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (рис. 26).

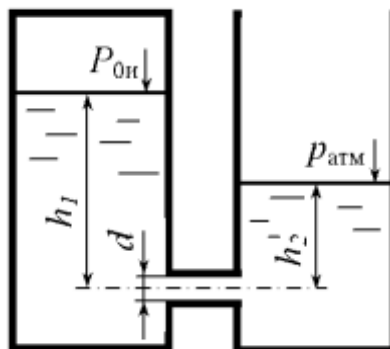


Рис. 26

Задание 16. Из закрытого резервуара вода вытекает через отверстие диаметром $d_0 = 0,02$ м и внешний цилиндрический насадок диаметром $d_n = 0,02$ м. Определить избыточное давление в резервуаре, если разность расходов через насадок и отверстие $\Delta Q = 7 \cdot 10^{-4}$ м³/с, а глубина $h = 1,5$ м (рис. 27).

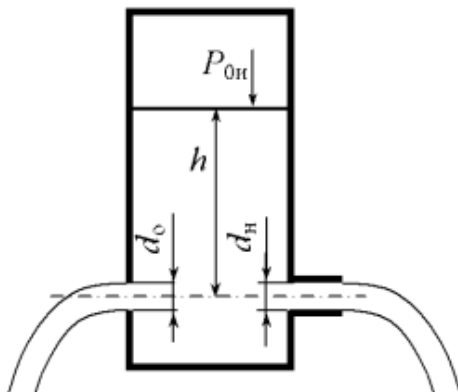


Рис. 27

Задание 17. В бак, разделенный тонкой перегородкой на два отсека, поступает вода с расходом $Q = 0,028$ м³/с. В перегородке имеется отверстие диаметром $d_1 = 0,10$ м. Из второго отсека вода выливается через внешний цилиндрический насадок диаметром $d_2 = 0,08$ м. Определить h_1 и h_2 (рис. 28).

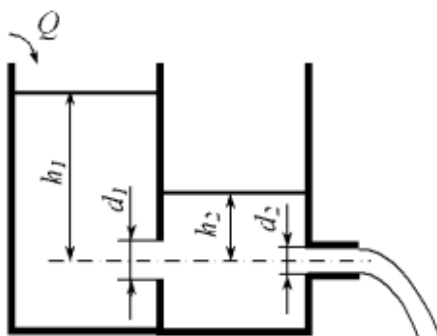


Рис. 28

Задание 18. Из открытого бака вода вытекает через малое отверстие в атмосферу. Глубина воды в баке $h = 3$ м поддерживается постоянной. При какой высоте h_1 отверстия от пола дальность падения струи l будет максимальной (рис. 29)?

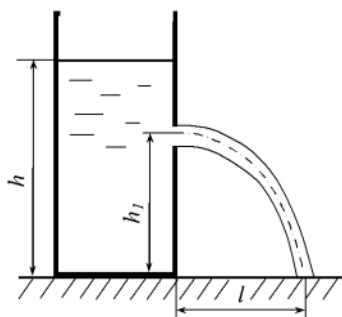


Рис. 29

Задание 19. Из бака при постоянном напоре вытекает вода через внешний цилиндрический насадок диаметром $d = 20$ мм. Определить расход, если давление в насадке равно 70 кПа.

Задание 20. Определить расход и давление в отверстии плотины, если $d = 0,5$ м, $l = 2$ м; $H = 8,5$ м (рис. 30)

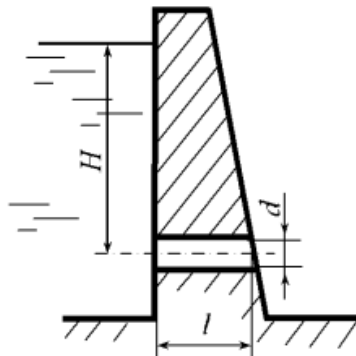


Рис. 30

Движение жидкости в напорных трубопроводах

Как уже отмечалось выше, перепад уровней энергии, за счет которого жидкость течет по трубопроводу, может создаваться работой насоса, что широко применяется в машиностроении. Рассмотрим совместную работу трубопровода с насосом и принцип расчета трубопровода с насосной подачей жидкости.

Трубопровод с насосной подачей жидкости может быть *разомкнутым*, т.е. по которому жидкость перекачивается из одной емкости в другую (рис. 31, а), или *замкнутым* (кольцевым), в котором циркулирует одно и то же количество жидкости (рис. 31, б).

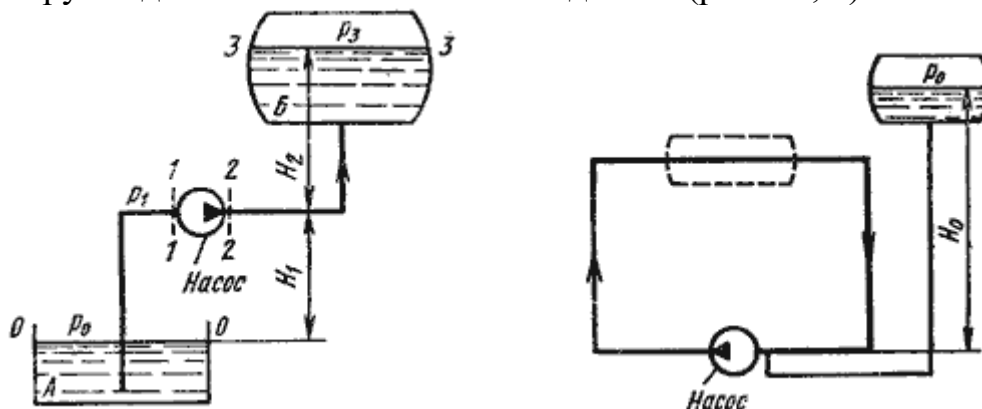


Рис. 31. Трубопроводы с насосной подачей

Рассмотрим трубопровод, по которому перекачивают жидкость из нижнего резервуара с давлением P_0 в другой резервуар с давлением P_3 (рис. 31, а). Высота расположения оси насоса H_1 называется *геометрической высотой всасывания*, а трубопровод, по которому жидкость поступает к насосу, *всасывающим трубопроводом* или *линией всасывания*. Высота расположения конечного

сечения трубопровода H_2 называется *геометрической высотой нагнетания*, а трубопровод, по которому жидкость движется от насоса, *напорным* или *линией нагнетания*.

Составим уравнением Бернулли для потока рабочей жидкости во всасывающем трубопроводе, т.е. для сечений 0-0 и 1-1 (принимая $\alpha = 1$):

$$\frac{P_0}{\rho g} = H_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + \sum h_{0-1}$$

Это уравнение является основным для расчета всасывающих трубопроводов.

Теперь рассмотрим напорный трубопровод, для которого запишем уравнение Бернулли, т.е. для сечений 2-2 и 3-3:

$$\underbrace{\frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}}_{\text{энергия на выходе из насоса}} = H_2 + \frac{P_3}{\rho g} + \sum h_{2-3}$$

Левая часть этого уравнения представляет собой энергию жидкости на выходе из насоса. А на входе насоса энергию жидкости можно будет аналогично выразить из уравнения:

$$\underbrace{\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}}_{\text{энергия на входе насоса}} = \frac{P_0}{\rho g} - H_1 - \sum h_{0-1}$$

Таким образом, можно подсчитать приращение энергии жидкости, проходящей через насос. Эта энергия сообщается жидкости насосом и поэтому обозначается обычно $H_{нас}$.

Для нахождения напора $H_{нас}$ вычислим уравнение :

$$H_{нас} = \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \right) - \left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} \right) = H_1 + H_2 + \frac{P_3 - P_0}{\rho g} + \sum h_{0-1} + \sum h_{2-3}$$

$$H_{нас} = \Delta z + \frac{P_3 - P_0}{\rho g} + KQ^m,$$

где Δz - полная геометрическая высота подъема жидкости,

$$\Delta z = H_1 + H_2;$$

KQ^m - сумма гидравлических потерь,

P_3 и P_0 - давление в верхней и нижней емкости соответственно.

Если к действительной разности уровней Δz добавить разность пьезометрических высот $(P_3 - P_0) / (\rho g)$, то можно рассматривать увеличенную разность уровней:

$$H_{ст} = \Delta z + \frac{P_3 - P_0}{\rho g}$$

и формулу можно переписать так:

$$H_{нас} = H_{ст} + KQ^m$$

Из этой формулы делаем вывод, что

$$H_{нас} = H_{нотр}$$

Отсюда вытекает следующее правило устойчивой работы насоса: при установившемся течении жидкости в трубопроводе насос развивает напор, равный потребному.

На этом равенстве основывается метод расчета трубопроводов с насосной подачей, который заключается в совместном построении в одном и том же масштабе и на одном графике двух кривых: напора $H_{потр} = f_1(Q)$ и характеристики насоса $H_{нас} = f_2(Q)$ и в нахождении их точки пересечения (рис. 32).

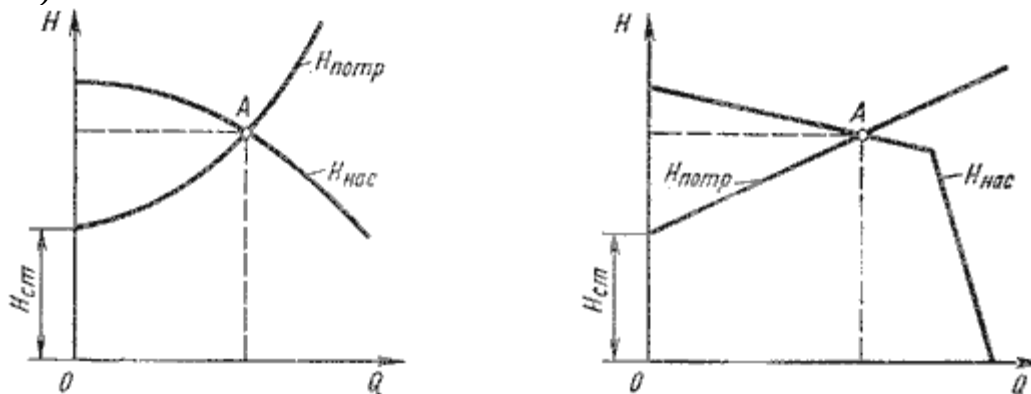


Рис. 32. Графическое нахождение рабочей точки

Характеристикой насоса называется зависимость напора, создаваемого насосом, от его подачи (расхода жидкости) при постоянной частоте вращения вала насоса. На рис. 32 дано два варианта графика: *а* - для турбулентного режима; *б* - для ламинарного режима. Точка пересечения кривой потребного напора с характеристикой насоса называется *рабочей точкой*. Чтобы получить другую рабочую точку, необходимо изменить открытие регулировочного крана (изменить характеристику трубопровода) или изменить частоту вращения вала насоса.

Задачи:

Задание 1. Определить режим движения воды в водопроводной трубе диаметром $d=300$ мм, если протекающий по ней расход $Q=0,136$ м³/с. Температура воды 10°C.

Задание 2. Найти минимальный диаметр d напорного трубопровода, при котором нефть будет двигаться при турбулентном режиме, если кинематический коэффициент вязкости нефти $\nu=0,3$ см²/с, а расход в трубопроводе $Q=8$ л/с.

Задание 3. По трубе диаметром $d=0,1$ м под напором движется вода. Определить расход, при котором турбулентный режим сменится ламинарным, если температура воды $t=25^\circ\text{C}$.

Задание 4. Определить режим движения воды в водопроводной трубе диаметром $d=300$ мм, если протекающий по ней расход $Q=0,136$ м³/с. Температура воды 10°C.

Задание 5. Определить критическую скорость, соответствующую переходу от ламинарного режима к турбулентному в трубе диаметром $d=$

0,03 м при движении воды, воздуха и глицерина при температуре 25 °С.

Задание 6. Определить число Рейнольдса и режим движения воды в водопроводной трубе диаметром $d = 300$ мм при расходе $Q = 0,136$ м³/с и температуре воды 10 °С ($\nu = 1,306 \cdot 10^{-6}$ м²/с).

Задание 7. Горизонтальный отстойник для осветления сточных вод представляет собой удлиненный прямоугольный в плане резервуар. Глубина его $h = 2,5$ м, ширина $b = 6$ м. Кинематический коэффициент вязкости $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Определить среднюю скорость и режим движения сточной жидкости, если ее расчетный расход $Q = 0,08$ м³/с. При какой скорости движения в отстойнике будет наблюдаться ламинарный режим движения жидкости?

Задание 8. Определить критическую скорость, при которой происходит переход от ламинарного режима к турбулентному, в трубопроводе диаметром $d=30$ мм при движении воды ($\nu= 0,009$ Ст), воздуха ($\nu= 0,162$ Ст) и глицерина ($\nu= 4,1$ Ст).

Задание 9. Определить потери напора по длине при равномерном движении жидкости по трубопроводу со средней скоростью $V_{cp} = 0,4$ м/с, если кинематический коэффициент вязкости $\nu = 0,4 \cdot 10^{-4}$ м²/с, диаметр трубопровода $d = 100$ мм и длина $l = 1000$ м.

Задание 10. Из напорного бака, в котором поддерживается постоянный уровень $H = 3$ м, по наклонному трубопроводу переменного сечения движется вода. Диаметры участков трубопровода $d_1= 40$ мм, $d_2 = 25$ мм, длины соответственно $l_1 = 50$ м, $l_2 = 75$ м. Начало трубопровода расположено выше его конца на величину $z = 1,5$ м. Определить расход воды в трубопроводе, если коэффициент гидравлического трения $\lambda = 0,035$ для обоих участков трубопровода. Местными потерями напора пренебречь. (рис. 23)

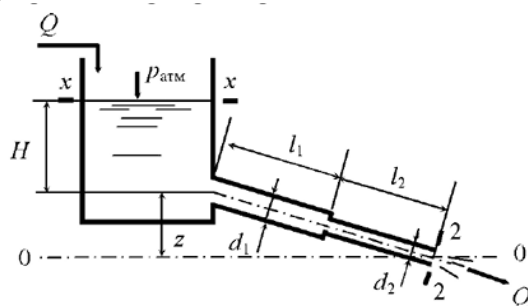


Рис. 23

Задание 11. Из напорного бака по наклонному трубопроводу переменного сечения (рис. 23) движется жидкость с относительной плотностью $\delta = 0,85$. Диаметры участков трубопровода $d_1= 50$ мм, $d_2= 30$ мм, а длины соответственно $l_1 = 80$ м, $l_2 = 40$ м. Начало трубопровода расположено выше его конца на $z = 3,5$ м. Для обоих участков трубопровода коэффициент гидравлического трения $\lambda= 0,038$. Какой

уровень H необходимо поддерживать в напорном баке, чтобы скорость движения жидкости на выходе из трубопровода была $v=1,8$ м/с? Местными потерями напора пренебречь.

Задание 12. Вода из реки по самотечному трубопроводу длиной $L = 100$ м и диаметром $d = 150$ мм подается в водоприемный колодец с расходом $Q = 26,2$ л/с. Определить общие потери напора $h_{тр}$ в трубопроводе, если эквивалентная шероховатость трубы $\Delta_{экр} = 1$ мм, коэффициент кинематической вязкости $\nu = 0,01$ см²/с, коэффициент местного сопротивления входа в трубу $\zeta_{вх} = 3$, а выхода $\zeta_{вых} = 1$ (рис. 24).

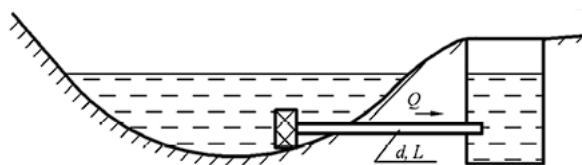


Рис. 24

Задание 13. Найти диаметр трубопровода для транспортирования водорода при массовом расходе $G = 120$ кг/ч. Длина трубопровода 1000 м, допускаемое падение давления $\Delta p = 1080$ Па. Плотность водорода $\rho = 0,0825$ кг/м³. Коэффициент трения $\lambda = 0,03$.

Задание 14. По сифону диаметром $d = 10$ см, длина которого $L = 20$ м, вода поступает из резервуара А в резервуар В. Разность уровней воды в резервуарах $H = 1$ м, а расстояние от уровня воды в резервуаре А до наивысшей точки сифона $h = 3$ м. Определить расход воды Q и величину наибольшего вакуума в сифоне. Труба старая стальная (рис. 25).

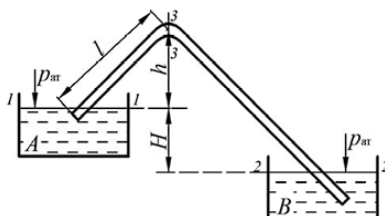


Рис. 25

Задание 15. Насос при рабочем ходе гидроцилиндра развивает давление $p_{ман}^н = 3$ МПа. Масло ($\rho_m = 900$ кг/м³; $\nu = 0,85$ см²/с) подается по трубопроводу диаметром $d = 20$ мм и длиной $l = 3$ м в гидроцилиндр $D = 80$ мм. Определить силу P на штоке гидроцилиндра при рабочем ходе, если расход масла $Q = 0,003$ м³/с, а коэффициент сопротивления дросселя $\zeta_{др} = 15$ (рис. 26).

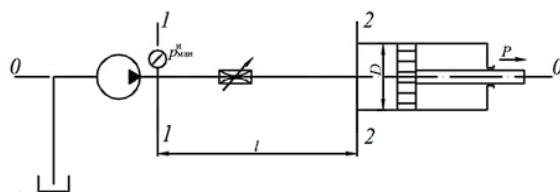


Рис. 26

Задание 16. Всасывающий трубопровод насоса имеет длину $l = 5$ м и диаметр $d = 32$ мм, высота всасывания $h = 0,8$ м. Определить давление в конце трубопровода (перед насосом), если расход масла ($\rho = 890$ кг/м³; $\nu = 10$ мм²/с), $Q = 50$ л/мин, коэффициент сопротивления колена $\zeta_k = 0,3$, вентиля $\zeta_v = 4,5$, фильтра $\zeta_{\phi} = 10$ (рис. 27).

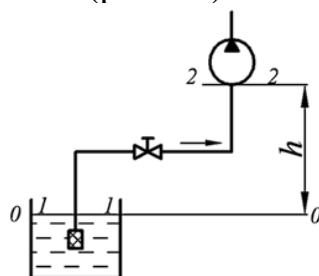


Рис. 27

Задание 17. Сифонный трубопровод длиной $L = 200$ м, диаметром $d = 200$ мм с горизонтальным участком CD соединяет водоем А с колодцем В. Разность уровней $h_1 = 2$ м; $h_2 = 3$ м; $h_3 = 6$ м. На трубопроводе имеются всасывающая коробка с сеткой, два колена и задвижка. Определить пропускную способность трубопровода Q и проверить условия его нормальной работы при температуре воды $t = 20$ °С (рис. 28).

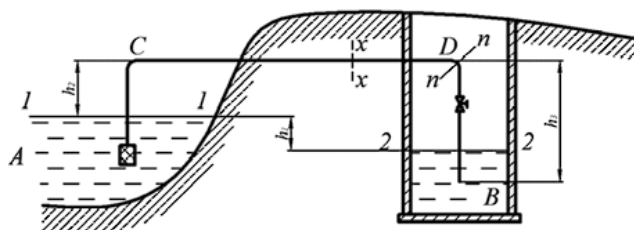


Рис. 28

Задание 18. Определить требуемый напор, который необходимо создать в сечении 1–1 для подачи в бак воды с вязкостью $\nu = 0,008 \cdot 10^{-4}$ м²/с, если длина трубопровода $l = 80$ м; его диаметр $d = 50$ мм; расход жидкости $Q = 15$ л/с; высота $H_0 = 30$ м; давление в баке $p_2 = 0,2$ МПа; коэффициент сопротивления крана $\zeta_1 = 5$; колена $\zeta_2 = 0,8$; шероховатость стенок $\Delta = 0,04$ мм (рис. 29).

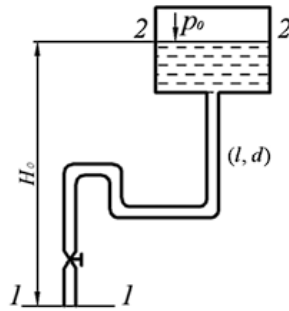


Рис. 29

Задание 19. Определить показания манометра p_m , если расход воды, проходящей по трубопроводу, составляет $Q = 30 \text{ м}^3/\text{ч}$. Длина трубопровода $l = 120 \text{ м}$, высота $h = 710 \text{ мм}$, диаметр труб $d = 100 \text{ мм}$, шероховатость $\Delta = 0,5 \text{ мм}$, степень открытия задвижки Лудло $h/d = 0,7$, радиус скругления отводов $R = 200 \text{ мм}$ (рис. 30).

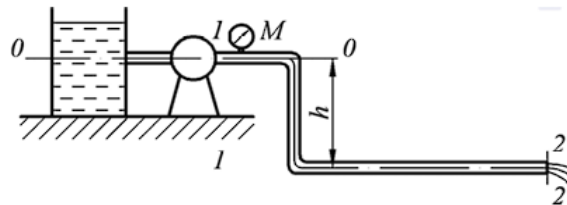


Рис. 30

Задание 20. Вода (20°C) из водонапорной башни подается в приемный резервуар по новому трубопроводу из сварных стальных труб диаметром d длиной 120 м . На трубопроводе имеется задвижка, обратный клапан. Определить диаметр трубопровода при условии открытия задвижки на $\frac{x}{d} = 0,75$ и обеспечении расхода 80 л/с . Разность уровней воды в башне и резервуаре считать постоянной и равной 5 м (рис. 31).

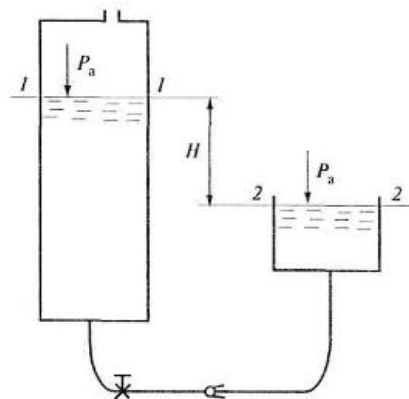


Рис. 31

Задание 21. По трубопроводу, соединяющему два резервуара, в которых поддерживаются постоянные уровни, перетекает вода с плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$. Диаметр трубопровода $d = 20 \text{ мм}$. В верхнем

баке поддерживается избыточное давление $p_{0\text{изб}} = 15$ кПа, а в нижнем - вакуумметрическое давление $p_{0\text{вак}} = 7$ кПа. Разность уровней в баках $H = 5$ м. Определить расход жидкости, если коэффициент гидравлического трения $\lambda = 0,028$, а длина трубопровода $l = 15$ м. Местными потерями напора пренебречь (рис. 32).

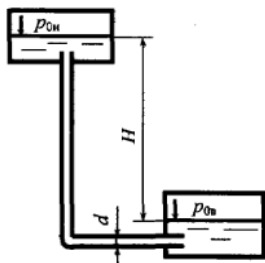


Рис. 32

Задание 22. Определить расход воды через сифонный трубопровод, если высота $H_1 = 1$ м, $H_2 = 2$ м, $H_3 = 4$ м. Общая длина трубы $l = 20$ м, диаметр $d = 20$ мм. Режим течения считать турбулентным. Учесть потери на входе в трубу $\zeta_1 = 1$, в коленах $\zeta_2 = 0,2$, в вентиле $\zeta_3 = 4$, на трение в трубе $\lambda = 0,035$. Подсчитать вакуум в верхнем сечении x-x трубы, если длина участка от входа в трубу до этого сечения $l_x = 8$ м (рис. 33).

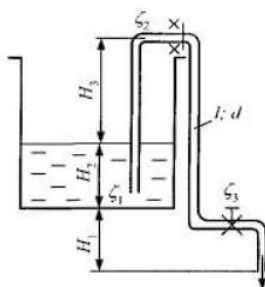


Рис. 33

Задание 23. Вода перетекает из бака А в резервуар Б по трубе диаметром $d = 25$ мм, длиной $l = 10$ м. Определить расход воды Q , если избыточное давление в баке $p_1 = 200$ кПа, высота уровней $H_1 = 1$ м, $H_2 = 5$ м. Режим течения считать турбулентным. Принять следующие коэффициенты сопротивления: на входе в трубу $\zeta_1 = 0,5$, в вентиле $\zeta_2 = 4$, в коленах $\zeta_3 = 0,2$, на трение $\lambda = 0,025$. Учесть потери при выходе трубопровода в бак Б (рис. 34).

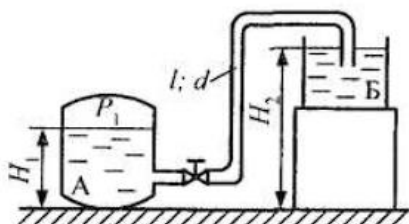


Рис. 34

Задание 24. Определить расход воды с вязкостью $\nu = 0,01$ Ст, перетекающей через трубу из бака А в резервуар Б, если диаметр трубы $d = 55$ мм, ее длина $l = 10$ м, высота $H = 8$ м. При решении принять коэффициент сопротивления крана $\zeta_1 = 3$, каждого колена $\zeta_2 = 1$, а эквивалентную шероховатость трубы $\Delta = 0,05$ мм. Учесть потери на внезапное сужение потока, при выходе из бака А и внезапное расширение при входе потока в резервуар Б (рис. 35).

Указание: Задачу решить методом последовательных приближений, задавшись коэффициентом Дарси λ , а затем, уточняя его.

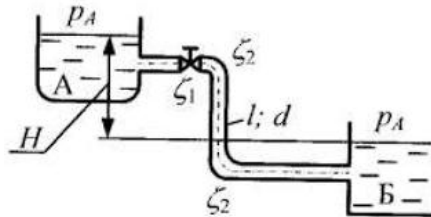


Рис. 35

Задание 25. Расход в основной гидролинии $Q = 3$ л/с. Определить расходы Q_1 и Q_2 в параллельных одинаковых по длине и диаметру трубах ($l = 1$ м, $d = 10$ мм), если в одной из них установлен дроссель D с коэффициентом сопротивления $\zeta = 9$. Коэффициент сопротивления трения $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,03$ (рис. 36).

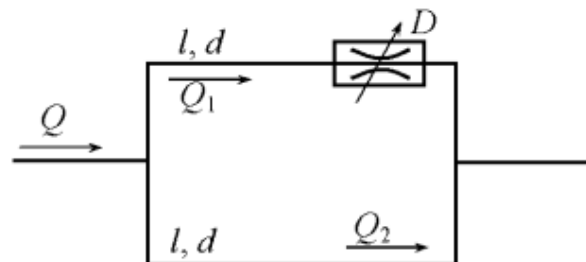
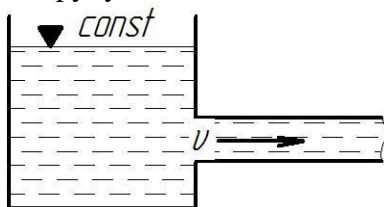
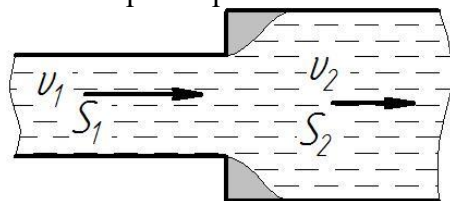
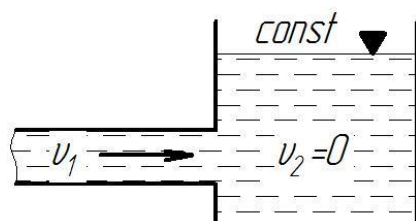
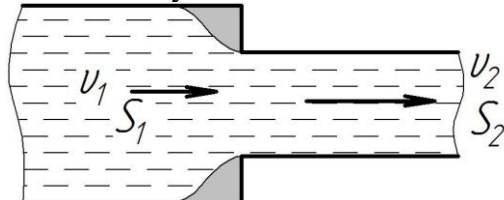
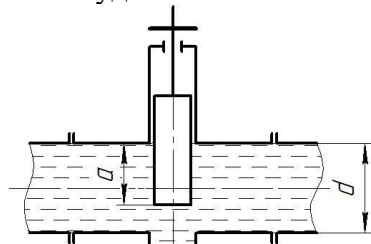
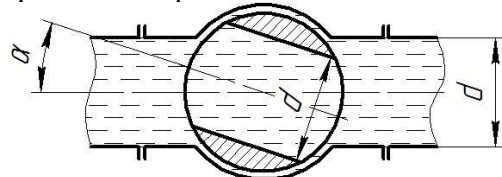


Рис. 36

Приложение 1

Местные сопротивления

Тип, схема местного сопротивления	Коэффициент местного сопротивления																				
Вход в трубу 	$h_{ex} = \zeta_{ex} \cdot \frac{v^2}{2g}$ При острых кромках $\zeta_{вх} = 0,5$; При закругленных кромках и плавном входе $\zeta_{вх} = 0,2$; При весьма плавном входе $\zeta_{вх} = 0,05$																				
Внезапное расширение 	$h_{e.p.} = \zeta_{e.p.} \cdot \frac{v_2^2}{2g}$ $\zeta_{e.p.} = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1 \right)^2$																				
Выход из трубы в резервуар больших размеров, выход под уровень 	$h_{ex} = \zeta_{ex} \cdot \frac{v_1^2}{2g}$ $\zeta_{ex} = 1,0$																				
Внезапное сужение 	$h_{e.c.} = \zeta_{e.c.} \cdot \frac{v_2^2}{2g} \quad \zeta_{e.c.} = f \left(\frac{S_2}{S_1} \right)$ <table><tr><td>S_2/S_1</td><td>0,01</td><td>0,10</td><td>0,20</td><td>0,40</td><td>0,60</td><td>0,80</td></tr><tr><td>$\zeta_{e.c.}$</td><td>0,50</td><td>0,45</td><td>0,40</td><td>0,30</td><td>0,20</td><td>0,10</td></tr></table>	S_2/S_1	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	$\zeta_{e.c.}$	0,50	0,45	0,40	0,30	0,20	0,10						
S_2/S_1	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80															
$\zeta_{e.c.}$	0,50	0,45	0,40	0,30	0,20	0,10															
Задвижка Лудло 	<table><tr><td>a/d</td><td>Полн. открыт.</td><td>1/4</td><td>3/8</td><td>1/2</td></tr><tr><td>$\zeta_{зав}$</td><td>0,12</td><td>0,28</td><td>0,81</td><td>2,06</td></tr><tr><td>a/d</td><td>5/8</td><td>3/4</td><td>7/8</td><td></td></tr><tr><td>$\zeta_{зав}$</td><td>5,25</td><td>17,0</td><td>978</td><td></td></tr></table>	a/d	Полн. открыт.	1/4	3/8	1/2	$\zeta_{зав}$	0,12	0,28	0,81	2,06	a/d	5/8	3/4	7/8		$\zeta_{зав}$	5,25	17,0	978	
a/d	Полн. открыт.	1/4	3/8	1/2																	
$\zeta_{зав}$	0,12	0,28	0,81	2,06																	
a/d	5/8	3/4	7/8																		
$\zeta_{зав}$	5,25	17,0	978																		
Пробковый кран 	<table><tr><td>α°</td><td>5</td><td>10</td><td>20</td><td>30</td></tr><tr><td>$\zeta_{кр}$</td><td>0,05</td><td>0,29</td><td>1,56</td><td>5,47</td></tr><tr><td>α°</td><td>40</td><td>50</td><td>60</td><td></td></tr><tr><td>$\zeta_{кр}$</td><td>17,3</td><td>52,6</td><td>206</td><td></td></tr></table>	α°	5	10	20	30	$\zeta_{кр}$	0,05	0,29	1,56	5,47	α°	40	50	60		$\zeta_{кр}$	17,3	52,6	206	
α°	5	10	20	30																	
$\zeta_{кр}$	0,05	0,29	1,56	5,47																	
α°	40	50	60																		
$\zeta_{кр}$	17,3	52,6	206																		

Приложение 2

Плотность, коэффициент кинематической вязкости некоторых жидкостей

Жидкость	Плотность ρ , кг/м ³	Кинематический коэффициент вязкости, ν , 10 ⁻⁶ м ² /с	
		при 20°C	при 50°C
Вода пресная	1000	1,01	0,55
Этиловый спирт	790	1,52	0,50
Ртуть	13600	0,114	-
Воздух	1,20	14,9	-
Бензин при t = 15°C	680-780	0,83-0,93	0,54
Керосин	820	2,5	1,5
Нефть	810-930	25,0-140,0	-
Масло турбинное 30 и 34	900	-	28-32
Масло трансформаторное	890	30,0	9,6
Масла промышленные			
И12	880	50	10-14
И20	885	100	17-23
И30	890	170	23-33
И50	910	400	47-55

Приложение 3

Сортамент стальных бесшовных холоднодеформированных труб

Нар. диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Нар. диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Нар. диаметр, мм	Толщина стенки, мм
5	0,3...1,5	25...28	0,4...7,0	140	1,6...22
6	0,3...2,0	30...36	0,4...8,0	150	1,8...22
7...9	0,3...2,5	38, 40	0,4...9,0	160	2,0...22
10...12	0,3...3,5	42	1,0...9,0	170	2,0...24
13...15	0,3...4,0	45,48	1,0...10	180	2,0...24
16...19	0,3...5,0	50...76	1,0...12	190	2,8...24
20	0,3...6,0	80...95	1,2...12	200...220	3,0...24
21...23	0,4...6,0	100...108	1,5...18	240	4,5...24
24	0,4...6,5	110...130	1,5...22	250	4,5...24

В указанных пределах диаметр брать из ряда: 7; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 21; 22; 23; 25; 26; 27; 28; 30; 32; 34; 35; 36; 36; 38; 40; 50; 51; 53; 54; 56; 57; 60; 63; 65; 68; 70; 73; 75; 75; 76; 80; 83; 85; 89; 90; 100; 102; 108; 110; 120; 130; 200; 210; 220 мм; толщину стенки - из ряда: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,5; 2,8; 3,0; 3,2; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 10,0; 11; 12; 14; 16; 18; 20; 22; 24 мм.

Пример обозначения:

Труба 54х2 ГОСТ 8734-75