ВЫСШЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

ГИДРАВЛИКА, ГИДРОМАШИНЫ И ГИДРОПРИВОДЫ В ПРИМЕРАХ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Под редакцией С. П. СТЕСИНА

*Допущено
Учебно-методическим объединением
по образованию в области транспортных машин
и транспортно-технологических комплексов
в качестве учебного пособия для студентов вузов,
обучающихся по специальностям направления подготовки
«Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования»*

2-е издание, стереотипное

ACADEMA

Москва
Издательский центр «Академия»
2013

УДК 556.556(075.8)
ББК 30.123я73
Г464

А в т о р ы:
Т. В. Артемьева, *Т. М. Лысенко*, *А. Н. Румянцева*, *С. П. Стесин*

Р е ц е н з е н т ы:
зам. генерального директора по научной работе,
главный ученый секретарь ФГУП ГНЦ РФ «НАМИ»,
д-р техн. наук, проф. *Ю. К. Есеновский-Лашков*;
д-р техн. наук, проф. кафедры «Системы приводов»
Московского государственного технологического
университета «СТАНКИН» *О. Н. Трифонов*

Гидравлика, гидромашины и гидроприводы в примерах ре-
Г464 шения задач : учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / [Т. В. Артемьева, Т. М. Лысенко, А. Н. Румянцева и др.] ; под ред. С. П. Стесина. — 2-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 208 с.
ISBN 978-5-7695-9515-8

Изложены основы механики жидкости и газа. Приведены примеры решения задач. Представлены основные положения теории гидромашин и гидропередач для самоходных транспортных средств. Рассмотрены примеры расчета основных параметров и показателей качества гидромашин и гидропередач для самоходных транспортных средств.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 556.556(075.8)
ББК 30.123я73

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

© Артемьева Т. В., Лысенко Т. М., Румянцева А. Н., Стесин С. П., 2011
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2011
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2011

ISBN 978-5-7695-9515-8

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое издание «Гидравлика, гидромашины и гидроприводы в примерах решения задач» представляет собой учебное пособие по дисциплинам «Гидравлические и пневматические системы», «Гидравлика и гидропневмопривод», предусмотренным учебными планами в высших учебных заведениях автотранспортного профиля.

Данное пособие дополняет опубликованное ранее учебное пособие «Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод» [Т. В. Артемьева, Т. М. Лысенко, А. Н. Румянцева и др.]; под ред. С. П. Стесина.

Назначение предлагаемого учебного пособия заключается в формировании у студентов практических навыков самостоятельного решения задач по расчету, проектированию и испытанию различных типов гидромашин и гидропередач, широко применяющихся в современных транспортных средствах, как самоходных, так и стационарных.

В отличие от опубликованных учебников и учебных пособий по данному профилю в данном издании предлагаются конкретные примеры численных решений по определению технических характеристик и отдельных параметров гидромашин и гидроприводов реальных машин и механизмов.

Изложение материала соответствует программам дисциплин гидравлического цикла, предусмотренных учебными планами в высших учебных заведениях для машиностроительных специальностей.

Главы 1, 2, 3, 4 написаны Т. В. Артемьевой и А. Н. Румянцевой, глава 5 — Т. М. Лысенко, главы 6, 7 — С. П. Стесиным.

Авторы выражают благодарность канд. техн. наук Е. А. Яковенко, доценту кафедры «Гидропривод и гидропневмоавтоматика» Московского автомобильно-дорожного института (Государственного технического университета) за ценные замечания при подготовке рукописи.

Глава 1

РАВНОВЕСИЕ КАПЕЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

1.1. Гидростатическое давление

Состояние жидкости, при котором она неподвижна относительно Земли, называется *абсолютным покоем жидкости*.

Состояние, при котором частицы жидкости неподвижны относительно друг друга и стенок сосуда, в котором она перемещается относительно Земли, называется *относительным покоем ж*идкости.

Поскольку в жидкости в обычных условиях отсутствуют растягивающие напряжения, а в состоянии равновесия жидкости не воспринимают касательных напряжений, в покоящейся жидкости действуют только напряжения сжатия.

Сжимающие напряжения в точке:

$$\vec{p} = \lim_{\Delta s \to 0} \Delta\vec{P} \big/ \Delta s,$$

где $\Delta\vec{P}$ — нормальная сжимающая сила, т.е. сила давления жидкости, приходящаяся на площадку Δs, содержащую рассматриваемую точку.

Напряжение имеет числовое значение и может быть представлено в виде произведения его числового значения на единичный вектор (орт):

$$\vec{p} = p\vec{e},$$

где p — числовое значение напряжения; $\vec{e}$ — орт.

Размерная величина, определяющая значение сжимающего напряжения в точке покоящейся жидкости, называется *гидростатическим давлением в точке*.

Первое свойство гидростатического давления: давление действует по внутренней нормали к площадке действия, поскольку определяет числовое значение напряжения сжатия в данной точке.

Второе свойство гидростатического давления: давление в данной точке не зависит от ориентации в пространстве площадки, на которую оно действует, и содержит данную точку.

Третье свойство гидростатического давления: давление зависит от координат точки в пространстве, определяющих глубину ее погружения под уровень.

Основной закон гидростатического давления: давление в данной точке покоящейся жидкости равно сумме внешнего давления p_o, передаваемого по закону Паскаля, и веса столба жидкости $\rho g h$ высотой h, равной погружению точки под уровень, и площадью основания, равного единице:

$$p = p_0 + \rho g h, \tag{1.1}$$

где p_0 — внешнее давление, которое может быть давлением на свободной поверхности жидкости или давлением, создаваемым поршнем или другой какой-нибудь внешней силой; h — глубина погружения точки под уровень.

Поверхность равного давления называется *поверхностью уровня*. Поверхность уровня, являющаяся границей жидкой и газообразной среды, называется *свободной*.

Давление, отсчитываемое от абсолютного нуля, называется *абсолютным* $p_{абс}$. Абсолютный нуль давления соответствует отсутствию сжимающих напряжений.

Разность между абсолютным и атмосферным давлением называется *избыточным*:

$$p_{изб} = p_{абс} - p_а, \tag{1.2}$$

где $p_{абс}$ — абсолютное давление; $p_а$ — атмосферное давление.

Если $p_{абс} > p_а$, то $p_{изб}$ показывает избыток давления над атмосферным, его называют *манометрическим* $p_{ман}$. Если $p_{абс} < p_а$, то избыточное давление — отрицательно и показывает недостаток до атмосферного давления. В этом случае его называют *вакуумметрическим давлением*:

$$p_{вак} = p_а - p_{абс};$$

$$p_{вак} = -p_{изб}. \tag{1.3}$$

Максимальный вакуум возможен, если абсолютное давление упадет до давления насыщенного пара, т. е. $p_{абс} = p_{н.п}$. Давление $p_{н.п}$ — это установившееся давление пара, находящегося в равновесии с жидкостью. Отсюда

$$p_{вак\ max} = p_а - p_{н.п}.$$

Если пренебречь давлением $p_{н.п}$, то

$$p_{вак\ max} = p_а. \tag{1.4}$$

Если давление на свободной поверхности равно атмосферному, то уравнение (1.1) принимает вид

$$p_{абс} = p_а + \rho g h. \tag{1.5}$$

Тогда избыточное давление будет манометрическим:

$$p_{\text{изб}} = p_{\text{ман}} = p_{\text{абс}} - p_{\text{а}} = \rho g h, \tag{1.6}$$

отсюда

$$h = \left(p_{\text{абс}} - p_{\text{а}}\right)/\rho g = p_{\text{ман}}/(\rho g), \tag{1.7}$$

где h — пьезометрическая или манометрическая высота.

Если имеет место вакуумметрическое давление

$$p_{\text{вак}} = p_{\text{а}} - p_{\text{абс}} = \rho g h_{\text{вак}},$$

то

$$h_{\text{вак}} = \left(p_{\text{а}} - p_{\text{абс}}\right)/(\rho g) = p_{\text{вак}}/(\rho g), \tag{1.8}$$

где $h_{\text{вак}}$ — вакуумметрическая высота.

Единицей измерения давления в системе СИ является паскаль 1 Па = 1 Н/м^2, в технической системе — техническая атмосфера 1 ат, равная 1 кгс/см^2 = 10^4 кгс/м^2 = 98,1 · 10^3 Па = 98,1 кПа = 98,1 · 10^{-3} МПа (1 кПа = 10^3 Па; 1 МПа = 10^6 Па).

При решении задач принимается атмосферное давление равным 1 ат = 98,1 кПа.

На рис. 1.1 представлен резервуар с жидкостью, находящейся в состоянии абсолютного покоя под действием только силы тяжести. На уровнях точек *А* и *В* присоединены стеклянные трубки, открытые в атмосферу, которые называются пьезометрами.

Из рис. 1.1 видно, что согласно основному закону гидростатики абсолютное давление в точке *В*:

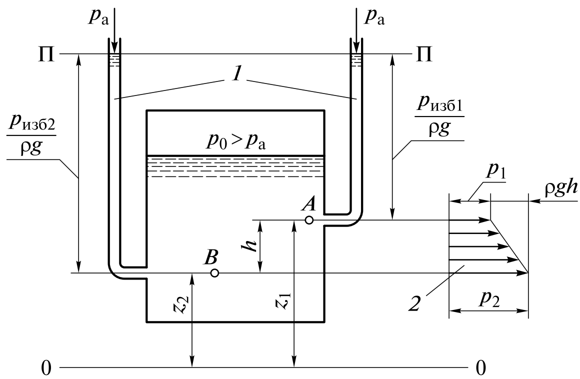


Рис. 1.1. Схема к определению пьезометрического напора:

1 — пьезометры; *2* — эпюра давления; $p_{\text{а}}$ — атмосферное давление; p_0 — абсолютное давление на свободной поверхности в резервуаре; 0—0 — плоскость сравнения; z_1 и z_2 — координаты точек *А* и *В* относительно плоскости сравнения 0—0; $p_{\text{изб1}}/(\rho g)$ и $p_{\text{изб2}}/(\rho g)$ — пьезометрические высоты для точек *А* и *В* соответственно; П—П — пьезометрическая плоскость

$$p_2 = p_1 + \rho g h, \tag{1.9}$$

где p_1 — абсолютное давление в точке A; h — расстояние между точками.

Расстояние h определим по формуле

$$h = z_1 - z_2, \tag{1.10}$$

где z_1 и z_2 — высоты расположения точек A и B над произвольной горизонтальной плоскостью, называемой *плоскостью сравнения*.

Из уравнений (1.9) и (1.10) следует, что

$$z_1 + p_1/(\rho g) = z_2 + p_2/(\rho g), \tag{1.11}$$

т. е. в жидкости при абсолютном покое, находящейся под действием силы тяжести,

$$z + p/(\rho g) = \text{const}, \tag{1.12}$$

поверхность равного давления представляют собой горизонтальные плоскости (z = const).

Если в условии (1.12) давление $p = p_{изб}$, то эта сумма называется *пьезометрическим напором*:

$$H_p = z + p_{изб}/(\rho g),$$

который является постоянным для любой точки данной жидкости относительно произвольно выбранной плоскости сравнения.

Уровни в пьезометрах устанавливаются в одной горизонтальной плоскости, называемой *пьезометрической*.

Давления по глубине изменяются линейно согласно основному закону гидростатики. На рис. 1.1 показана эпюра распределения давления по глубине между точками A и B.

Пример 1.1. Для определения положения уровня бензина в открытом баке употребляется прибор, схема которого изображена на рис. 1.2. Воздух накачивается в трубку до тех пор, пока он не начнет выходить пузырьками через бензин. Тогда по высоте столба масла в нижней трубке $h = 0{,}7$ м можно определить глубину бензина H. Плотность бензина $\rho_б = 720$ кг/м^3, плотность масла $\rho_м = 920$ кг/м^3.

Решение. Рассматривая систему в положении равновесия, напишем для поверхности уровня 0—0:

$$\rho_б g H = \rho_м g h,$$

отсюда

$$H = \rho_м h/\rho_б = 920 \cdot 0{,}7/720 \cong 0{,}9 \text{ м}.$$

Пример 1.2. К закрытому баллону, наполненному воздухом, подведены две трубки (рис. 1.3): одна с водой, где $\rho_в = 10^3$ кг/м^3, другая — с ртутью, где $\rho_{рт} = 13\,600$ кг/м^3. Определить h_2, если $h_1 = 0{,}3$ м.

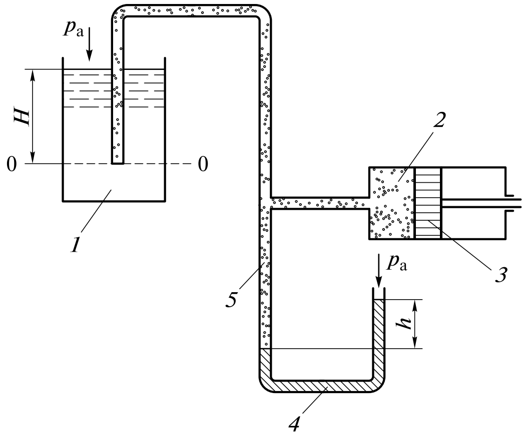


Рис. 1.2. Определение положения уровня бензина в открытом баке:
1 — бак с бензином; *2* — воздушный нагнетательный насос; *3* — поршень; *4* — масло; *5* — воздух

Решение. Используя основной закон гидростатики (1.1) запишем уравнение равновесия относительно свободной поверхности бака с водой:

$$p + \rho_в g h_1 = p_а,$$

где p — абсолютное давление в баллоне.

Уравнение равновесия относительно плоскости сравнения 0—0:

$$p + \rho_{рт} g h_2 = p_а.$$

Приравнивая уравнения, находим

$$h_2 = h_1 \rho_в / \rho_{рт} = 0{,}3 \cdot 10^3 / 13\,600 = 0{,}022 \text{ м}.$$

Пример 1.3. Определить избыточное давление в цилиндре под поршнем для трех его положений относительно свободной поверхности в резервуаре: 1) h_1 = 0,2 м; 2) h_2 = 0 м; 3) h_3 = 0,3 м. Найти наибольшую теоретическую высоту h_{3max}, на которую можно поднять воду в цилиндре. Давление на свободной поверхности воды в резервуаре — атмосферное $p_а$, плотность воды ρ = 1 000 кг/м^3 (рис. 1.4).

Решение. Положение 1. Абсолютное давление под поршнем согласно формуле (1.5):

$$p_{абс1} = p_а + \rho g h;$$

избыточное давление по выражению (1.2):

$$p_{изб1} = p_{абс1} - p_а = \rho g h_1 > 0,$$

$$p_{изб1} = p_{ман} = \rho g h_1 = 10^3 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}2 = 1\ 962 \text{ Па} = 1{,}96 \text{ кПа}.$$

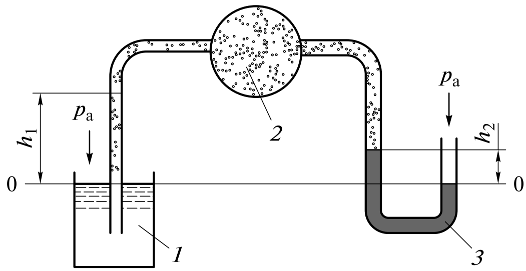


Рис. 1.3. Определение показания ртутного манометра:
1 — бак с водой; *2* — баллон с воздухом, давление которого p; *3* — ртуть

Положение 2. Абсолютное давление под поршнем

$$p_{абс2} = p_а;$$

избыточное давление по выражению (1.2):

$$p_{изб2} = p_{абс2} - p_а = 0.$$

Положение 3. Абсолютное давление под поршнем

$$p_{абс3} = p_а - \rho g h_3;$$

избыточное давление

$$p_{изб3} = p_{абс3} - p_а = -\rho g h_3 < 0.$$

Согласно выражению (1.3)

$$-p_{изб3} = p_{вак} = \rho g h_3 = 10^3 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}3 = 2\,943 \text{ Па} = 2{,}94 \text{ кПа}.$$

Теоретическая максимальная величина вакуума по формуле (1.4):

$$p_{вак\ max} = \left|p_а\right|.$$

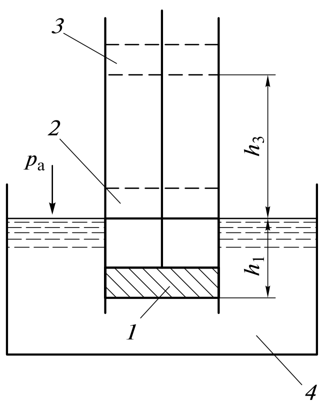


Рис. 1.4. Определение давления в цилиндре под поршнем:
1, *2*, *3* — три положения поршня; *4* — резервуар с водой

Поэтому наибольшая теоретическая высота подъема воды в цилиндре из формулы (1.8):

$$h_{\text{вак max}} = p_{\text{вак max}}/(\rho g) = |p_{\text{а}}|/(\rho g) = 98100/(10^3 \cdot 9{,}81) = 10 \text{ м.}$$

1.2. Закон Паскаля

Основное уравнение гидростатики (1.1)

$$p = p_0 + \rho g h$$

является аналитическим выражением закона Паскаля, согласно которому давление, создаваемое поверхностной силой, передается без изменения всем точкам данной жидкости.

Из этого уравнения видно, что в случае изменения внешнего давления p_0 на величину Δp_0 давление во всех точках данной жидкости, находящейся в равновесии, изменится на ту же величину Δp_0:

$$p = p_0 + \Delta p_0 + \rho g h.$$

Если давление в точке *1* (см. рис. 1.1) изменится на величину Δp, то давление в точке *2*, как следует из уравнения (1.11), должно измениться на ту же величину Δp:

$$z_1 + (p_1 + \Delta p)/(\rho g) = z_2 + (p_2 + \Delta p)/(\rho g).$$

Закон Паскаля можно сформулировать так: всякое изменение давления в какой-либо точке покоящейся жидкости, не нарушающее ее равновесие, передается в остальные ее точки без изменений. Закон Паскаля указывает на способность жидкости передавать усилия на расстояние. Эта особенность жидкостей широко используется в технике.

На этом законе основана работа гидравлических домкратов, прессов, мультипликаторов, подъемников, тормозов, объемного гидропривода, систем гидропневмоавтоматики и др.

Пример 1.4. Какой прибор (пьезометр, ртутный манометр, механический манометр) целесообразно установить в гидроцилиндре на глубине H = 0,3 м, если к поршню приложена сила P = 0,1 кН (рис. 1.5). Расстояние от точки измерения давления до уровня ртути в ртутном манометре a = 0,05 м. Плотность жидкости в цилиндре ρ = 900 кг/м^3, плотность ртути $\rho_{\text{рт}}$ = 13 600 кг/м^3.

Решение. Манометрическое давление на измеряемой глубине:

$$p_{\text{ман}} = P/s + \rho g H = 4P/(\pi d^2) + \rho g H,$$

где s — площадь поршня, $s = \pi d^2/4$;

$$p_{\text{ман}} = \frac{100 \cdot 4}{3{,}14 \cdot 0{,}035^2} + 900 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}3 = 106\,639{,}3 \text{ Па} = 106{,}64 \text{ кПа.}$$

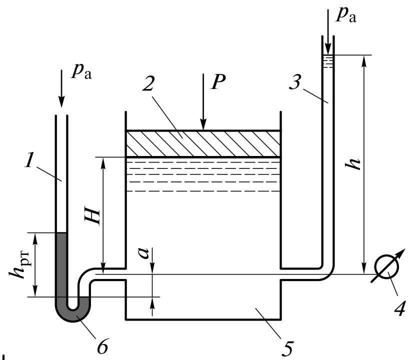


Рис. 1.5. Определение давления в гидроцилиндре разными приборами:

1 — ртутный манометр; *2* — поршень; *3* — пьезометр; *4* — манометр; *5* — вода; *6* — ртуть

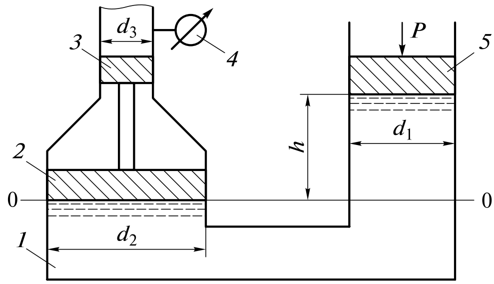


Рис. 1.6. Схема сообщающихся сосудов:

1 — сообщающиеся сосуды; *2*, *3*, *5* — поршни; *4* — манометр

Высота жидкости в пьезометре по формуле (1.7):

$$h = \frac{p_{ман}}{\rho g} = \frac{106\,639{,}3}{900 \cdot 9{,}81} = 12{,}08 \text{ м.}$$

Высота столба ртути $h_{рт}$ в ртутном манометре определяется из формулы [3]:

$$p_{ман} = \rho_{рт} g h_{рт} - \rho g a,$$

отсюда

$$h_{рт} = \frac{p_{ман} + \rho g a}{\rho_{рт} g} = \frac{106639{,}3 + 900 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}05}{13\,600 \cdot 9{,}81} = 0{,}8 \text{ м.}$$

Следовательно, для измерения давления целесообразно установить механический манометр.

Пример 1.5. Определить манометрическое давление $p_{ман}$ в верхней части одного из сообщающихся сосудов, наполненных водой, под действием силы P = 1,962 кН, приложенной к поршню второго сосуда (рис. 1.6). Исходные данные: d_1 = 0,2 м, d_2 = 0,4 м, d_3 = 0,1 м, h = 0,65 м.

Р е ш е н и е. Запишем уравнение равновесия относительно поверхности уровня 0—0 на глубине h, используя закон Паскаля:

$$\frac{p_{ман}\, \pi d_3^2/4}{\pi d_2^2/4} = 4P\big/\left(\pi d_1^2\right) + \rho g h,$$

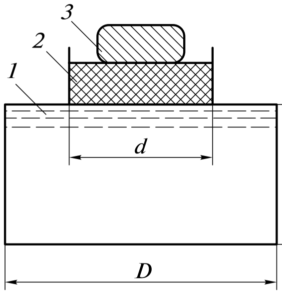


Рис. 1.7. Схема сосуда с грузом на его крышке:

1 — сосуд; *2* — крышка; *3* — груз

отсюда

$$p_{\text{ман}} = \left(\frac{4P}{\pi d_1^2} + \rho g h\right)\left(\frac{d_2}{d_3}\right)^2 =$$

$$= \left(\frac{4 \cdot 1\,962}{3{,}14 \cdot 0{,}2^2} + 10^3 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}65\right)\left(\frac{0{,}4}{0{,}1}\right)^2 =$$

$$= 1\ 101\ 776 \text{ Па} = 1{,}1 \text{ МПа}.$$

Пример 1.6. Определить силу давления на дно сосуда (рис. 1.7), наполненного водой, если на крышку его положен груз $G = 3{,}0$ кН. Размеры сосуда $D = 1{,}0$ м, $d = 0{,}5$ м, $h = 2{,}0$ м и $\rho_в = 10^3$ кг/м^3.

Решение. Гидростатическое давление на уровне дна сосуда согласно закону Паскаля определяется по формуле (1.1):

$$p = p_0 + \rho g h,$$

где p_0 — гидростатическое уравнение под крышкой сосуда, $p_0 = 4G/(\pi d^2)$.

Сила давления на дно сосуда

$$P = p\pi D^2/4 = \left(4G\big/\left(\pi d^2\right) + \rho g h\right)\pi D^2/4 =$$

$$= \left(4 \cdot 3\,000\big/\left(3{,}14 \cdot 0{,}5^2\right) + 10^3 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}0\right)3{,}14 \cdot 1{,}0^2/4 = 2\,740 \text{ Н} = 2{,}7 \text{ кН}.$$

Пример 1.7. Гидравлический пресс состоит из двух сообщающихся цилиндров с большим и малым поршнями, имеющими диаметры d и D, и служит для создания больших усилий при прессовании или испытании строительных материалов (рис. 1.8). Определить диаметр D большого поршня гидравлического пресса, находящегося в равновесии при следующих данных: сжимающее усилие большого поршня $F = 5\,000$ Н; усилие на рукоятке рычага $T = 150$ Н; диаметр малого поршня $d = 0{,}05$ м; плечи рычага $a = 0{,}15$ м, $b = 0{,}75$ м. Разностью в высотном положении поршней и их весом пренебречь. Коэффициент полезного действия $\eta = 0{,}85$.

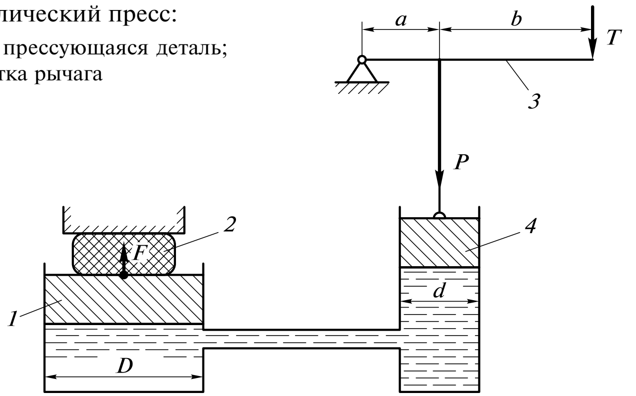
Решение. Находим силу P, которая передается плунжерному насосу посредством рычага. Для этого составляем уравнение моментов относительно шарнира и из него находим

$$P = T\left(a + в\right)\big/a = 150\left(0{,}15 + 0{,}75\right)\big/0{,}15 = 900 \text{ Н}.$$

Так как поршни находятся в равновесии, то уравнение равновесия относительно большого поршня согласно закону Паскаля:

$$4F/(\pi D^2) = 4P\eta/(\pi d^2), \text{ или } F/D^2 = P\eta/d^2,$$

Рис. 1.8. Гидравлический пресс:
1 и *4* — поршни; *2* — прессующаяся деталь;
3 — рукоятка рычага



отсюда

$$D = d\sqrt{F/(P\eta)} = 0{,}05\sqrt{5\,000/(900 \cdot 0{,}85)} = 0{,}128 \text{ м}.$$

Пример 1.8. Гидравлический мультипликатор устанавливается в гидропрессовых установках, когда давление, создаваемое аккумулятором, недостаточно. Определить давление p, получаемое в гидравлическом мультипликаторе (рис. 1.9) размерами $D = 0{,}5$ м и $d = 0{,}1$ м, если масло подается под поршень под давлением $p_{\text{ман}} = 490$ кПа, коэффициент полезного действия $\eta = 0{,}85$.

Р е ш е н и е. Сила давления жидкости, передаваемая на большой поршень:

$$P = p_{\text{ман}}\pi d^2/4 = 490 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}5^2/4 = 96 \text{ кН}.$$

Давление, передаваемое маслу в верхнем цилиндре от малого поршня, по закону Паскаля:

$$p = 4P\eta/(\pi d^2) = (4 \cdot 96 \cdot 0{,}85)/(3{,}14 \cdot 0{,}1^2) = 104 \text{ кПа}.$$

Пример 1.9. Какую силу P нужно приложить к поршню левого цилиндра, наполненного водой, чтобы уравновесить давление воды на поршень правого цилиндра при следующих данных: диаметры поршней $d_1 = 0{,}3$ м, $d_2 = 0{,}2$ м, $d_3 = 0{,}4$ м? Высота столба воды в пьезометрической трубке $h_2 = 1{,}2$ м, левый поршень поднят на высоту $h_1 = 0{,}5$ м (рис. 1.10).

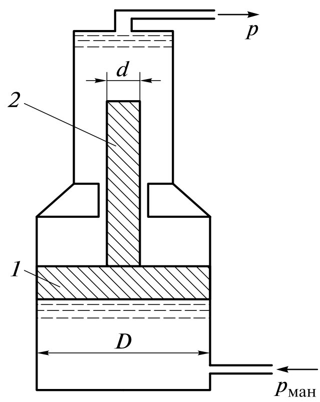


Рис. 1.9. Гидравлический мультипликатор:
1 и *2* — поршни

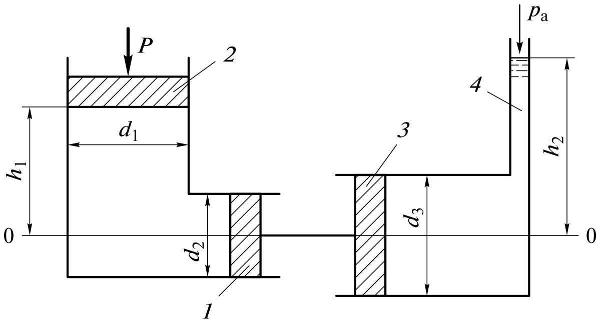


Рис. 1.10. Системы равновесия трех цилиндров с поршнями:
1, *2*, *3* — поршни; *4* — пьезометр

Р е ш е н и е. Запишем уравнение равновесия относительно плоскости 0—0, используя закон Паскаля:

$$4P\Big/\left(\pi d_1^2\right)+\rho g h_1=\rho g h_2\left(d_3/d_2\right)^2,$$

отсюда

$$P=\pi d_1^2\rho g\left(h_2\left(d_3/d_2\right)^2-h_1\right)\Big/4=$$

$$=3{,}14\cdot 0{,}3^2\cdot 10^3\cdot 9{,}81\left(1{,}2\left(0{,}4/0{,}2\right)^2-0{,}5\right)\Big/4=2\,980\text{ Н}\cong 3\text{ кН}.$$

Пример 1.10. Гидравлический аккумулятор (рис. 1.11) состоит из цилиндра *3*, в котором ходит плунжер *2* диаметром D = 0,1 м. Аккумулятор заряжается насосом, который нагнетает воду по трубке *1* в цилиндр *3* и заставляет его подниматься с грузом весом G = 196 кН. Давление, которое создается в цилиндре *3*, передается по закону Паскаля к прессу по трубке *4*. При разрядке аккумулятора цилиндр опускается.

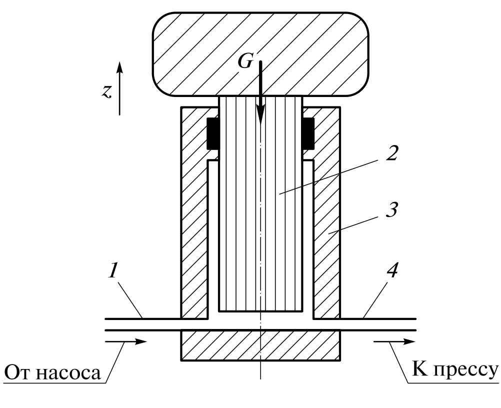


Рис. 1.11. Гидравлический аккумулятор:
1 — трубка для подачи воды от насоса; *2* — плунжер; *3* — цилиндр; *4* — трубка для подвода воды к прессу

Определить давление p_1 при зарядке и p_2 при разрядке аккумулятора и его КПД. Ширина манжеты уплотнения $b = 0{,}025$ м, коэффициент трения манжеты о плунжер $f = 0{,}1$.

Решение. Рассмотрим силы, действующие на плунжер и цилиндр. Составим уравнение равновесия всех действующих сил при зарядке и разрядке гидроаккумулятора:

$$\sum z = 0;\quad -G + p_1\frac{\pi D^2}{4} - p_1 f\pi Db = 0;\quad -G + p_2\frac{\pi D^2}{4} + p_2 f\pi Db = 0,$$

отсюда находим

$$p_1 = G\Big/\left(\pi D^2/4 - f\pi Db\right) = 196\cdot 10^3\Big/\left(3{,}14\cdot 0{,}1^2/4 - 0{,}1\cdot 3{,}14\cdot 0{,}1\cdot 0{,}025\right) =$$
$$= 27{,}7\cdot 10^6\ \text{Па} = 27{,}7\ \text{МПа};$$

$$p_2 = G\Big/\left(\pi D^2/4 + f\pi Db\right) = 196\cdot 10^3\Big/\left(3{,}14\cdot 0{,}1^2/4 + 0{,}1\cdot 3{,}14\cdot 0{,}1\cdot 0{,}025\right) =$$
$$= 22{,}7\cdot 10^6\ \text{Па} = 22{,}7\ \text{МПа}.$$

КПД гидроаккумулятора находим из отношения

$$\left(p_2/p_1\right)\cdot 100 = \left(22{,}7/27{,}7\right)\cdot 100 \cong 82\,\%.$$

Пример 1.11. Определить давление масла p_1, подводимого в поршневую полость гидроцилиндра, если избыточное давление в штоковой полости $p_2 = 80$ кПа, усилие на штоке $R = 20$ кН, сила трения в подвижных сочленениях $F_{тр} = 1{,}1$ кН, диаметр поршня $D = 125$ мм, диаметр штока $d = 70$ мм (рис. 1.12).

Решение. Запишем уравнение равновесия всех действующих сил на поршень:

$$R + P_2 + F_{тр} - P_1 = 0,$$

где P_1 — сила давления масла в поршневой полости, $P_1 = p_1\pi D^2/4$; P_2 — сила давления масла в штоковой полости, $P_2 = p_2\pi\left(D^2 - d^2\right)/4$.

Подставив выражение P_1 и P_2 в уравнение равновесия сил, получим

$$R + p_2\pi\left(D^2 - d^2\right)/4 + F_{тр} - p_1\pi D^2/4 = 0,$$

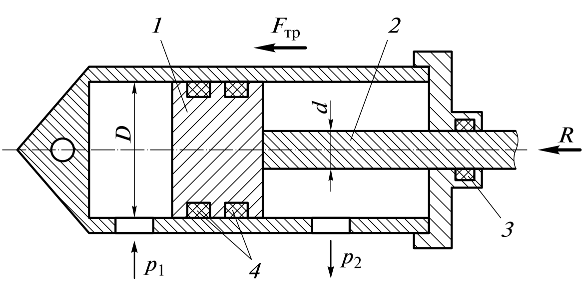


Рис. 1.12. Гидроцилиндр:

1 — поршень; *2* — шток; *3* и *4* — уплотнения отсюда

$$p_1 = 4\left(R + p_2\pi\left(D^2 - d^2\right)/4 + F_{\text{тр}}\right)/\left(\pi D^2\right) =$$

$$= 4\left(20\cdot10^3 + 80\cdot10^3\cdot3{,}14\left(0{,}125^2 - 0{,}07^2\right)/4 + 1{,}1\cdot10^3\right)/\left(3{,}14\cdot0{,}125^2\right) =$$

$$1\,777{,}883 \text{ Па} \cong 1{,}8 \text{ МПа}.$$

Пример 1.12. Определить давление жидкости, при котором откроется отверстие *4* предохранительного клапана, если диаметры поршней $d = 20$ мм и $D = 25$ мм, предварительный натяг x пружины *5* равен 20 мм, жесткость пружины $c = 7{,}1$ Н/мм, вес поршней $G = 0{,}34$ Н. Силой трения пренебречь (рис. 1.13).

Решение. По закону Паскаля при равновесии системы сила давления на поршень *1*:

$$P_1 = p\pi\left(d^2 - d_0^2\right)/4;$$

на поршень *3*

$$P_2 = p\pi\left(D^2 - d_0^2\right)/4,$$

где d_0 — диаметр штока *2*.

Сила предварительного поджатия пружины *5*:

$$F = cx.$$

Уравнение равновесия:

$$P_2 + G = P_1 + F.$$

Подставим в него P_1 и P_2:

$$p\pi\left(D^2 - d^2\right)/4 + G = p\pi\left(d^2 - d_0^2\right)/4 + F.$$

После преобразования уравнение равновесия приобретает следующий вид:

$$p\pi\left(D^2 - d_0^2\right)/4 = F - G.$$

Клапан начинает открываться, когда давление жидкости превысит

$$p > 4(F - G)/\left(\pi\left(D^2 - d^2\right)\right) =$$

$$= 4(cx - G)/\left(\pi\left(D^2 - d^2\right)\right) =$$

$$4(7{,}1\cdot20 - 0{,}34)/\left(3{,}14\left(0{,}025^2 - 0{,}020^2\right)\right) =$$

$$= 790\,715 \text{ Па} \cong 0{,}791 \text{ МПа}.$$

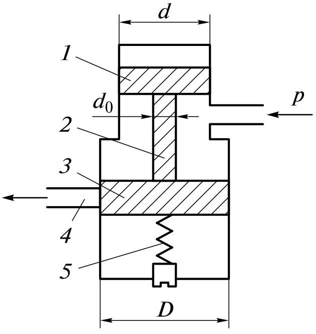
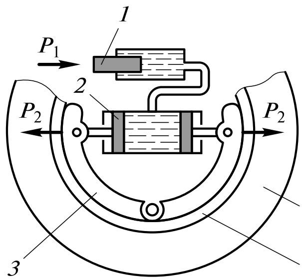


Рис. 1.13. Предохранительный клапан:

1 и *3* — поршни; *2* — шток; *4* — отверстие для отвода жидкости; *5* — пружина

Рис. 1.14. Схема к определению силы на тормозные колодки:

1 — поршень главного тормозного цилиндра; *2* — поршень колесного тормозного цилиндра; *3* — тормозные колодки; *4* — тормозной барабан; *5* — фрикционная прокладка



Пример 1.13. С какой силой тормозная колодка *3* прижимается к тормозному барабану *4* колеса автомобиля, если диаметр поршня *1* главного тормозного цилиндра d_1 = 15 мм, а диаметр поршня *2* колесного тормозного цилиндра d_2 = 20 мм? Сила, передаваемая от педали тормоза поршню *1*, равна P_1 = 420 Н (рис. 1.14).

Решение. Давление, создаваемое в главном тормозном цилиндре силой P_1:

$$p = 4P_1 \big/ \left(\pi d_1^2\right).$$

Сила, действующая на тормозные колодки, по закону Паскаля:

$$P_2 = p\pi d_2^2 / 4 = P_1 d_2^2 / d_1^2 = 420\left(0{,}020/0{,}015\right)^2 = 746{,}7 \text{ Н} = 0{,}747 \text{ кН}.$$

Пример 1.14. На рис. 1.15 представлена простейшая схема гидроуправления заслонкой *2*. Давление жидкости в трубопроводе *3* действует через распределительный кран *4* на поршень силового цилиндра *1*, жестко связанного с заслонкой *2*. Положение крана, показанное сплошной линией, соответствует открытию заслонки. Определить диаметр *d* силового цилиндра для подъема заслонки, установленной на трубопроводе диаметром *D* = 200 мм. Разница давлений по обе стороны заслонки Δp = 600 кПа. Масса подвижных частей *m* = 100 кг. Коэффициент трения заслонки в направляющих *f* = 0,1.

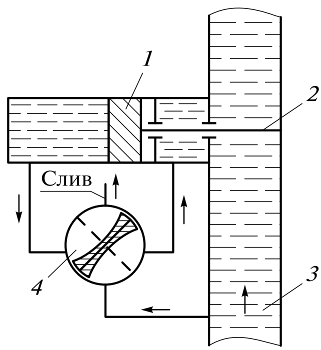


Рис. 1.15. Гидравлическая схема управления заслонкой:

1 — поршень силового цилиндра; *2* — заслонка; *3* — трубопровод; *4* — распределительный кран

Решение. Сила давления на заслонку:

$$P = \Delta p \pi D^2 / 4 =$$

$$600 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}2^2 / 4 = 18{,}84 \text{ кН}.$$

Сила, необходимая для подъема заслонки:

$$F = fP + mg = 0{,}1 \cdot 18\,840 + 100 \cdot 9{,}81 = 2\,865 \text{ Н}.$$

Требуемая площадь силового цилиндра:

$$s = F/\Delta p = 2\,865/\left(600 \cdot 10^3\right) = 0{,}0048 \text{ м}^2.$$

Искомый диаметр силового цилиндра:

$$d = \sqrt{4s/\pi} = 1{,}3\sqrt{0{,}0048} \cong 0{,}08 \text{ м} = 80 \text{ мм}.$$

1.3. Относительный покой жидкости

На рис. 1.16 показан резервуар с жидкостью, который движется равноускоренно с горизонтальным ускорением a. Жидкость в этом случае находится под действием силы тяжести G и силы инерции от горизонтального перемещения F, которые для единичной массы равны $G = g$ и $F = a$. Ускорение от действия этих массовых сил $\vec{j} = \vec{g} + \vec{a}$. Давление на свободной поверхности p_0.

Для системы координат, показанной на рис. 1.16, давление в любой точке рассматриваемой жидкости [4]:

$$p = p_0 + \rho g\left(ax/g + z\right), \tag{1.13}$$

где

$$a/g = \operatorname{tg}\alpha, \tag{1.14}$$

где α — угол наклона поверхности уровня к горизонту.

Обозначив

$$h = x\operatorname{tg}\alpha + z,$$

получаем основное уравнение гидростатики:

$$p = p_0 + \rho g h,$$

где h — глубина погружения точки K под уровень (см. рис. 1.16).

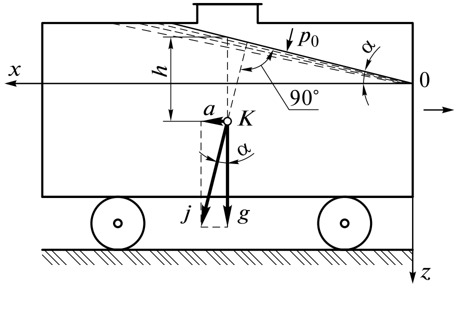


Рис. 1.16. Схема к определению давления жидкости в резервуаре при прямолинейном равноускоренном движении:

a — ускорение передвижения резервуара; g — ускорение свободного падения; j — суммарное ускорение; h — глубина погружения произвольной точки K; p_0 — давление на свободной поверхности; α — угол наклона поверхности уровня к горизонту

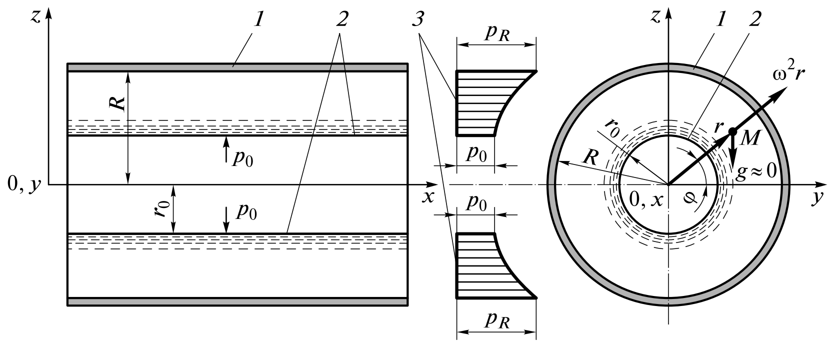


Рис. 1.17. Схема к определению давления жидкости в цилиндре при его вращении вокруг горизонтальной оси с постоянной скоростью:

1 — цилиндр; *2* — свободная поверхность; *3* — эпюры давления; p_0 — давление на свободной поверхности; r_0 — радиус свободной поверхности; R — внутренний радиус цилиндра; r — радиус произвольной точки M; φ — угол между направлением радиуса r и координатой плоскости $x0y$; ω — угловая скорость цилиндра; p_R — давление на стенку цилиндра

Уравнение поверхности уровня:

$$z = -ax/g\ , \tag{1.15}$$

откуда следует, что поверхность уровня, в том числе и свободная поверхность, есть плоскость, наклоненная к горизонту под углом

$$\alpha = \mathrm{arctg}\left(-a/g\right),$$

а равнодействующая массовых сил нормальна к поверхности уровня.

Рассмотрим случай вращения цилиндра с жидкостью вокруг горизонтальной оси с постоянной угловой скоростью ω, когда ускорение силы тяжести пренебрежимо мало по сравнению с центробежным ускорением (рис. 1.17).

Следовательно, единичная сила тяжести $G = g \approx 0$, единичная сила инерции $F = \omega^2 r$ (r — радиус рассматриваемой точки).

Давление жидкости в точке с радиусом r [4]:

$$p = p_0 + \left(\rho\omega^2/2\right)\left(r^2 - r_0^2\right), \tag{1.16}$$

где p_0 — давление на свободной поверхности; r_0 — радиус свободной поверхности.

Из выражения (1.16) следует, что давление на стенку цилиндра определяется по формуле

$$p_R = p_0 + \left(\rho\omega^2/2\right)\left(R^2 - r_0^2\right), \tag{1.17}$$

где R — внутренний радиус цилиндра.