

Общая гидравлика

Лекция 3 Гидростатическое давление

3.1 Методы и приборы для измерения давления, абсолютное и избыточное давление. Вакуум

Единицей давления является Ньютон на квадратный метр – паскаль.

Для практических вычислений эта единица неудобна, поэтому чаще применяют кратные единицы – килоПаскаль (кПа) и мегаПаскаль (мПа):
1кПа = 10³ Па; 1 мПа = 10⁶ Па.

Атмосферное давление в какой-либо точке зависит от высоты этой точки над уровнем моря и незначительно колеблется в одной и той же точке.

Нормальное атмосферное давление на уровне моря при температуре 0°С принимают равным $p_{ат} = 101,3$ кПа (760 мм рт. ст.).

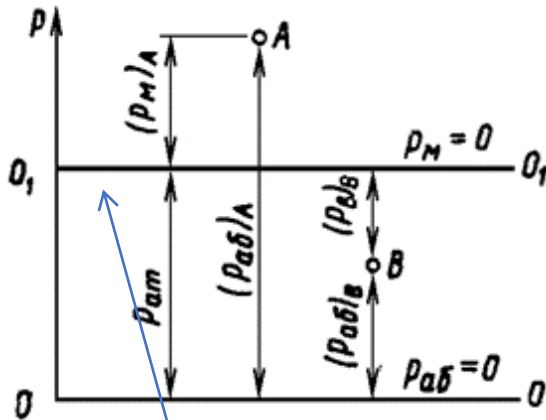
$$1 \text{ Па} = 0,0075 \text{ мм рт. ст.}, \text{ или } 1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}$$

Часто жидкость сверху соприкасается с газом.

Поверхность раздела между жидкостью и газообразной средой называется свободной поверхностью жидкости.

Различают абсолютное давление $p_{аб}$, манометрическое (избыточное) – p_M и вакуум – p_B , между которыми следующие зависимости:

$$p_M = p_{аб} - p_{ат}; \quad p_B = p_{ат} - p_{аб}; \quad p_B = -p_M$$



Жидкость давит на поверхность, с которой она соприкасается. При определении силы гидростатического давления, как правило, оперируют манометрическим давлением или вакуумом, так как атмосферное давление действует на расчетную конструкцию со всех сторон, и поэтому его можно не принимать во внимание.

При определении силы давления часто используется так называемая пьезометрическая плоскость или плоскость атмосферного давления – горизонтальная плоскость, проходящая через уровень жидкости в пьезометре, присоединенном к сосуду. Поверхность жидкости на уровне пьезометрической плоскости подвергается лишь воздействию атмосферного давления, т. е. $p_M = 0$. Если сосуд с жидкостью открыт в атмосферу, то пьезометрическая плоскость совпадает со свободной поверхностью жидкости.

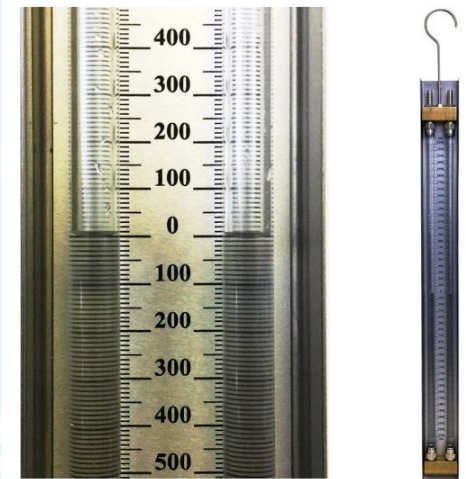
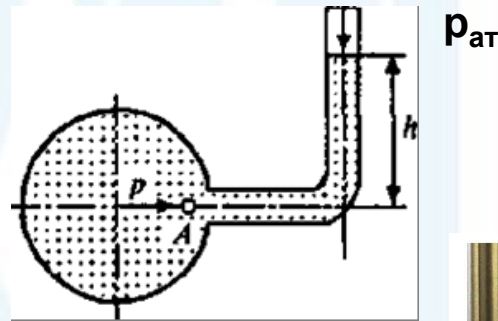
В случае же герметично закрытого сосуда она **может располагаться выше или ниже свободной поверхности.**

Приборы, применяемые для измерения давления, можно разделить на две основные группы:

- жидкостные;
- металлические.

Принцип действия жидкостных приборов основан на уравновешивании измеряемого давления высотой столба жидкости.

Простейший прибор жидкостного типа - пьезометр, представляющий собой стеклянную трубку небольшого диаметра (около 8—10 мм), один конец которой открыт и сообщается с атмосферой. Второй конец присоединяется к сосуду, в котором измеряется давление.



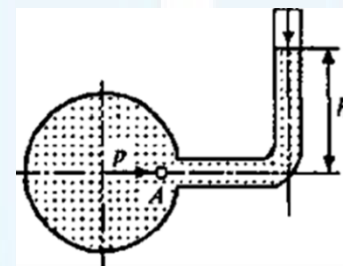
Пусть давление p_A больше атмосферного p_{at} ($p_A > p_{at}$),
Жидкость в трубке пьезометра поднимается на определенную высоту,
так, что вес столба жидкости будет уравнивать разницу в
давлениях p_A и p_{at} :

Давление в точке А у основания пьезометрической трубки определяется
по формуле гидростатического давления:

$$p_A = p_{at} + \gamma h$$

Отсюда легко определить высоту на которую поднимется жидкость в
трубке пьезометра

$$h = \frac{p_A - p_{at}}{\gamma} = \frac{p}{\gamma}$$



Таким образом, высота жидкости в пьезометре характеризует не
истинное давление в точке А, а избыток этого давления над
атмосферным или барометрическим - p

Рассмотрим случай измерения давления газа с помощью U-образного ртутного манометра.

На основании формулы гидростатического давления можно записать

$$p_B = p_A + \gamma_{\text{в}} h_1 \quad p_C = p_{\text{атм}} + \gamma_{\text{рт}} h_2$$

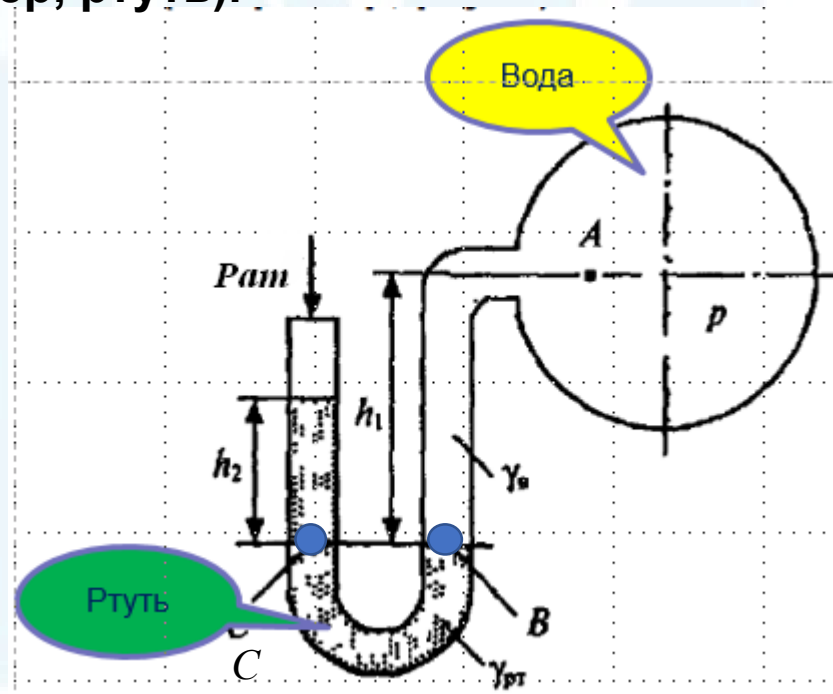
Давления в точках В и С равны, так как они находятся на поверхности равного давления в жидкости (например, ртуть).

Тогда

$$p_B = p_C \Rightarrow p_A + \gamma_{\text{в}} h_1 = p_{\text{атм}} + \gamma_{\text{рт}} h_2$$

Откуда

$$p_A = p_{\text{атм}} + \gamma_{\text{рт}} h_2 - \gamma_{\text{в}} h_1$$



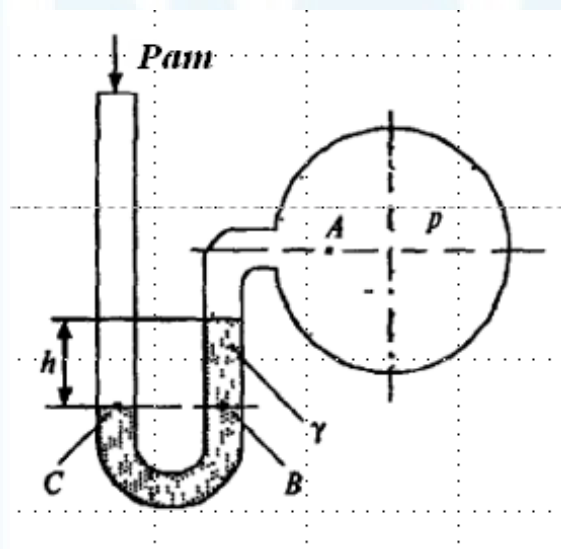
Если абсолютное давление в сосуде меньше атмосферного, то для измерения его применяются вакуумметры.

Если для измерения вакуума применяют жидкостные приборы, то последние обычно также выполняют в виде так называемого U-образного манометра, как и для измерения давления

В точках С и В давление одинаково и равно атмосферному - $p_{ат}$

Тогда по формуле гидростатического давления будем иметь

$$p_B = p_C = p_{ат} \Rightarrow p + \gamma h = p_{ат}$$
$$h = \frac{p_{ат} - p}{\gamma}$$

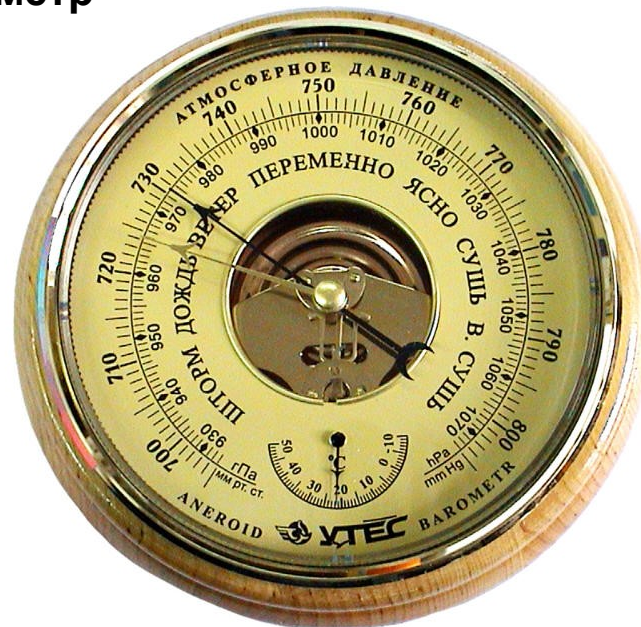


Разность $p_{ат}-p$ называют вакуумом, т. е вакуумом называют разность между атмосферным давлением и абсолютным в том случае, когда абсолютное давление меньше атмосферного. Например, абсолютное давление в сосуде

Манометр



Барометр



Вакуометр

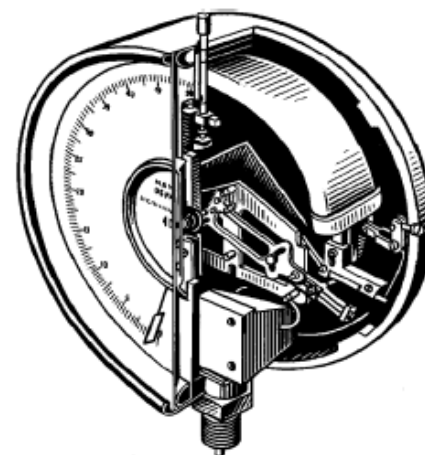
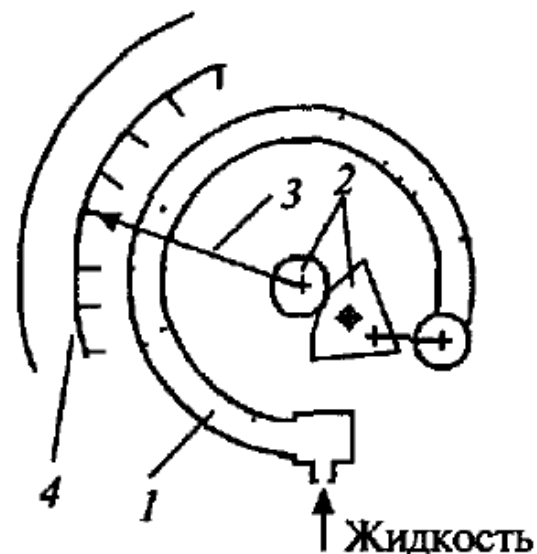


Из металлических приборов наиболее распространенным на практике является пружинный манометр, принцип действия которого следующий.

Под действием давления жидкости полая пружина 1 частично распрямляется и посредством зубчатого механизма 2 приводит в движение стрелку 3, перемещающуюся относительно шкалы 4.

Принцип действия пружинного манометра основан на уравнивании силы давления жидкости упругой силой пружины.

Пружинный манометр также показывает избыточное давление.



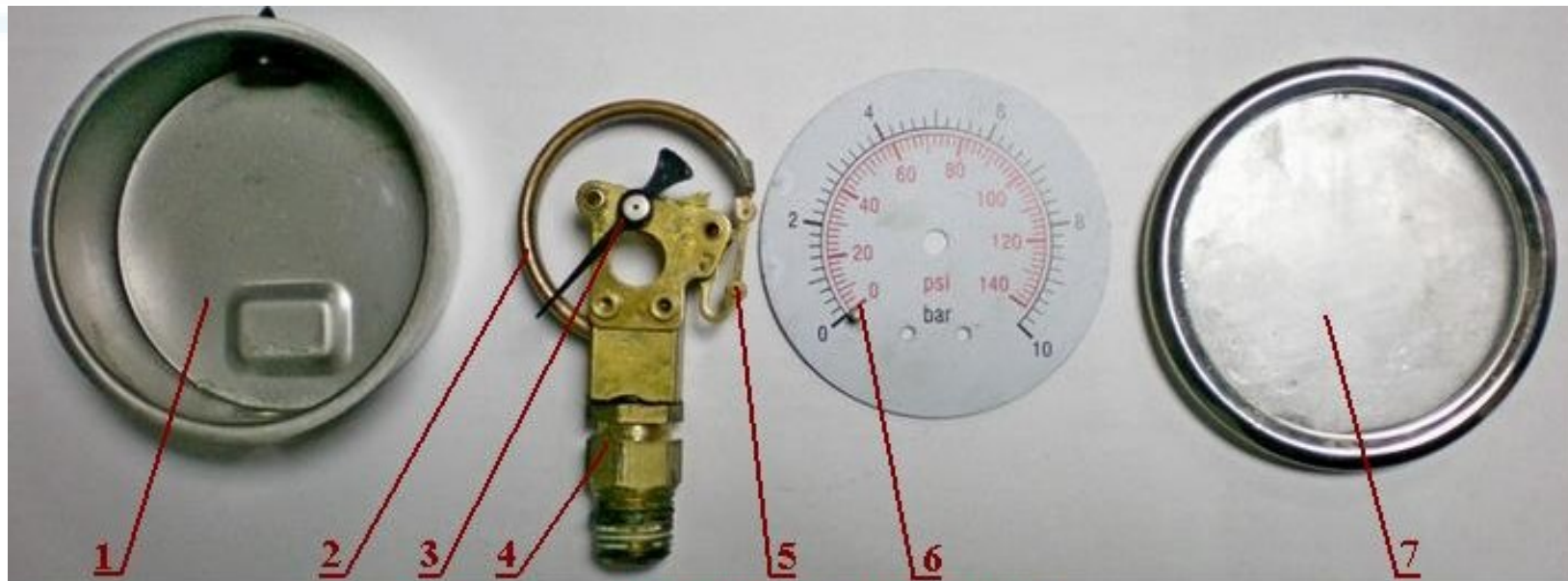
В качестве упругого элемента в деформационных манометрах, является трубка Бурдона.

Трубка Бурдона представляют собой трубку в виде полукруга с поперечным сечением в виде овала для небольших давлений, а для средних и высоких давлений она имеет форму витка, изготовленную из латуни или фосфористой бронзы.

Один конец трубки приварен к входному штуцеру манометра, а второй запаян. При подаче давления измеряемой среды овальное сечение трубки становится почти круглой формы. Заваренный конец трубки начинает разгибаться пропорционально приложенному давлению.

Это движение через рычажно-зубчатую передачу воздействует на стрелку, которая на шкале прибора указывает величину приложенного давления.

Манометры состоят из металлического корпуса (Поз. 1) на (Рис. 1), изготовленного из стали или нержавеющей стали.



Устройство манометра

- | | | |
|--------------------------|-------------------------------------|------------------|
| 1. Корпус прибора | 4. Подсоединительный штуцер | 7. Стекло |
| 2. Трубка Бурдона | 5. Рычажно-зубчатая передача | |
| 3. Стрелка | 6. Шкала | |

Рис.1

Название манометр произошло от греческого слова *manos* – редкий, неплотный, разрежённый – это прибор, позволяющий измерять давление жидкостей, газов и пара.

Манометры используются в тех случаях, когда необходимо определить, регулировать или контролировать давление. Эти приборы применяются в различных отраслях промышленности, в сельском и жилищно-коммунальном хозяйстве, на транспорте, в строительстве и в быту. Существуют изделия для измерения избыточного и абсолютного давления.

Избыточное давление – это давление в сосуде не учитывающее давления атмосферы (окружающей среды). Такое давление очень часто еще называют манометрическим.

Избыточное давление составляет разницу между абсолютным давлением и атмосферным давлением.

Абсолютное давление – это величина давления, измеренная относительно абсолютного вакуума (абсолютного нуля).

Как известно в полном вакууме абсолютное давление равно нулю. На уровне моря абсолютное давление равно одной атмосфере (1 бар). Абсолютное давление составляет сумму между избыточным и атмосферным давлением

Манометры для измерения атмосферного давления, называются барометрам

Вакуумметры – это приборы используются для измерения давления ниже атмосферного.

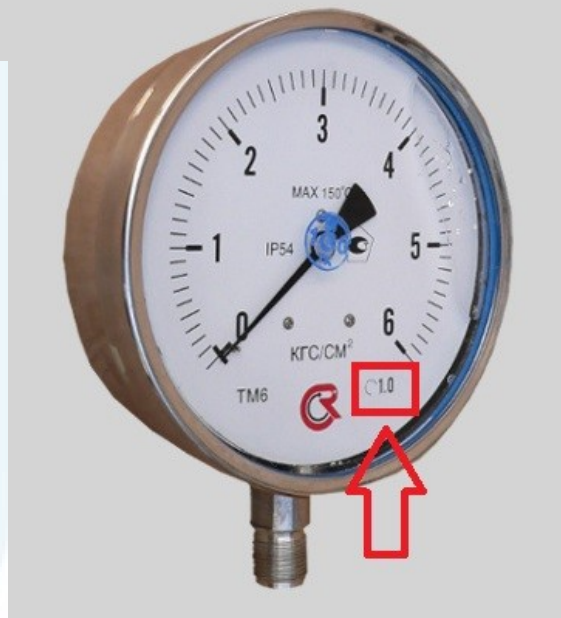
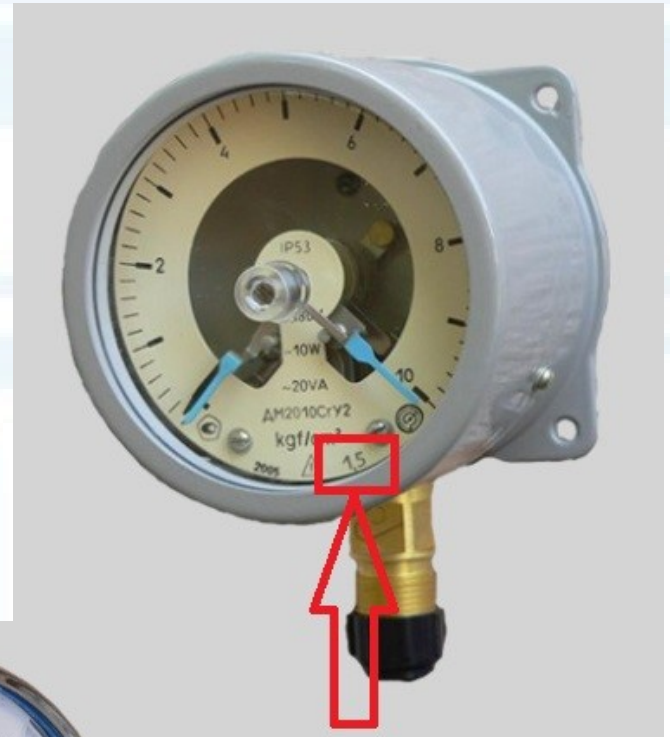
Мановакуумметры – это изделия которые могут измерять как избыточное так вакуумметрическое давление.

Напоромеры – это приборы, которые используются для измерения малых избыточных давлений.

Шкала приборов может быть проградуирована в мегапаскалях (МПа) или килопаскалях (кПа), а также в барах, кгс/см², атмосферах или кгс/м², мм вод. ст., мм рт. ст. и т.д.

По классу точности манометры подразделяются на: 0,15; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 (чем значение числа меньше, тем прибор точнее).

Отечественные и импортные манометры изготавливаются согласно общепринятыми стандартами, при этом приборы различных марок и производителей могут заменять друг друга. Для подбора манометра, необходимо знать: какой нужен предел измерения, размер корпуса, класс точности, а также тип корпуса и подсоединительный размер штуцера. Оптимальный диапазон измерения манометра находится в средней трети измеряемого прибором давления. Для отечественных изделий и изделий, выпускаемых в Европе, эти данные одинаковы.



3.2 Гидростатический напор

При выводе основного уравнения гидростатики было получено дифференциальное уравнение вида

$$dp + \rho g dz = 0$$

И его решение в виде

$$p = \rho g z + C$$

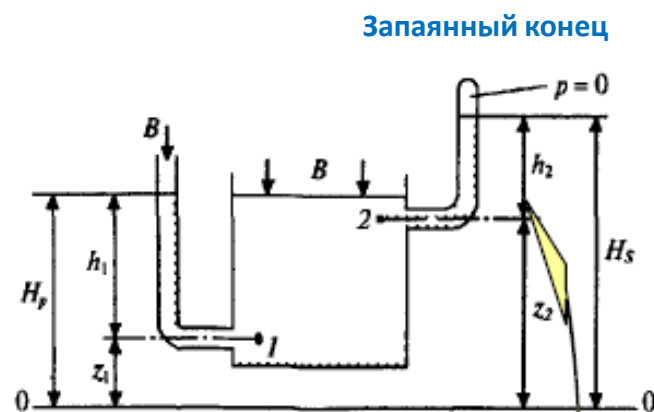
Которое может быть представлено

$$\frac{p}{\gamma} + z = C = \text{const}$$

Величина $\frac{p}{\gamma} = h$ представляет ту высоту, на которую поднялась бы

жидкость в пьезометре, если бы верхний конец его находился под **нулевым давлением** $p=0$

Таким образом, это есть высота, соответствующая абсолютному давлению в жидкости. Она называется приведенной (высота h_2)



$z = z_2$ - геометрическая высота выбранной точки над условной плоскостью сравнения 0 - 0. Отсюда

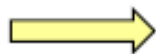
$$z_2 + \frac{p}{\gamma} = H_S = \text{const.}$$

Уравнение показывает, что *сумма двух высот z_2 и p/γ для любой точки жидкости остается постоянной.*

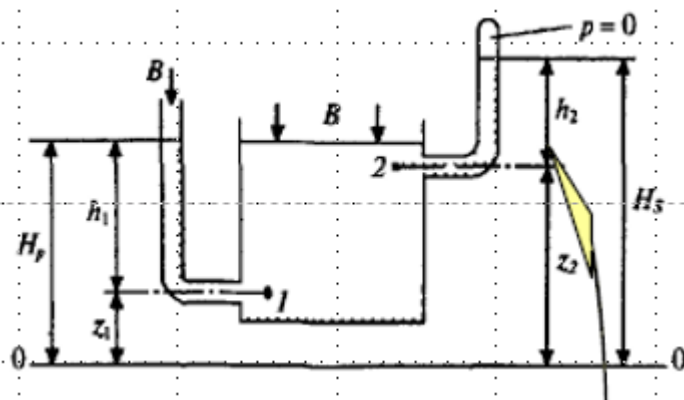
Эта сумма называется абсолютным (полным) гидростатическим напором.

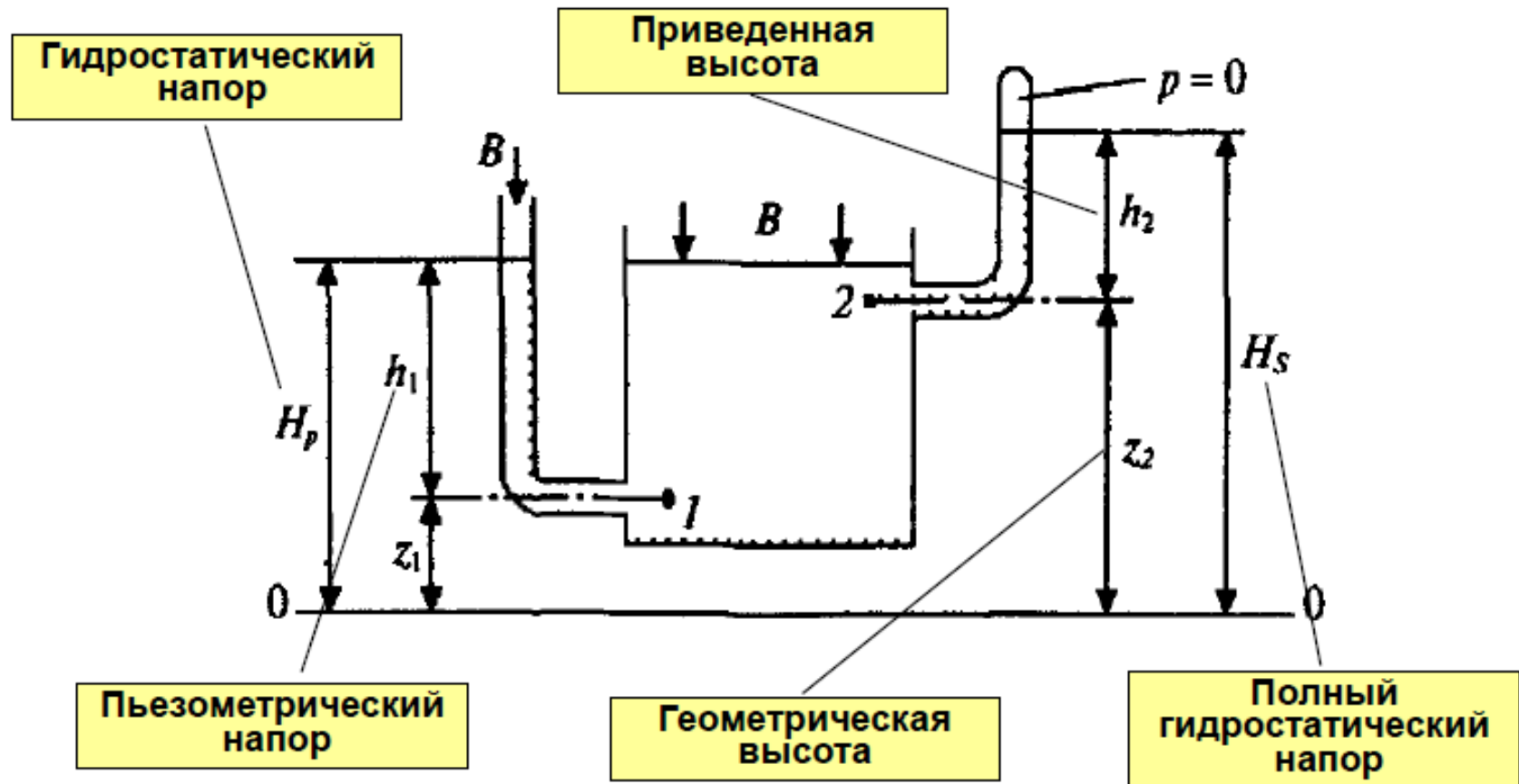
Если конец пьезометра соединить с атмосферой при давлении B , то получим

$$z_2 + \frac{p}{\gamma} = H_S = \text{const.}$$



$$z_1 + \frac{p - B}{\gamma} = H_p = \text{const.}$$





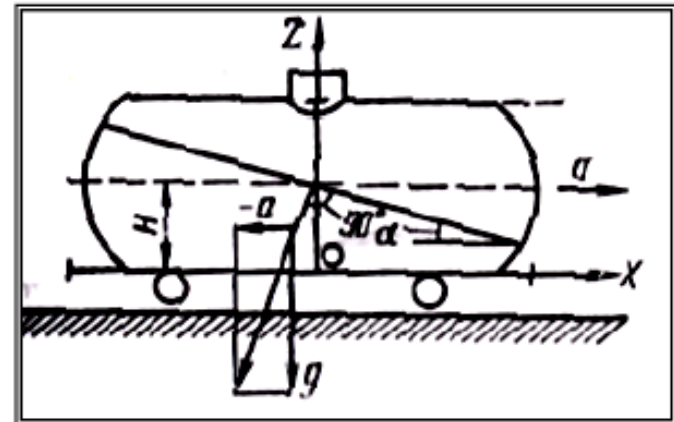
Горизонтальная плоскость, проведенная на высоте H_p , называется **плоскостью гидростатического или пьезометрического напора**, а H_s - **плоскостью абсолютного (полного) напора**. Очевидно, что $H_p < H_s$.

3.3 Интегрирование уравнений Эйлера для случая относительного покоя жидкости

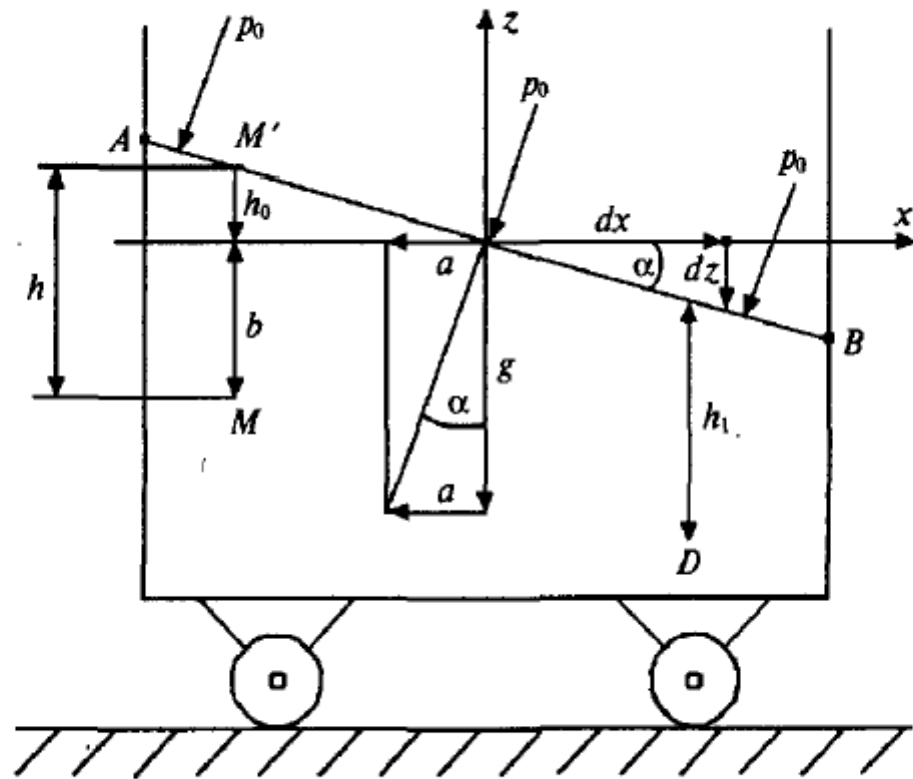
Пусть жидкость находится в емкости, *которая движется прямолинейно и равноускоренно по горизонтальной плоскости с ускорением a .*

Например, свободная поверхность бензина в железнодорожной цистерне, движущейся горизонтально с ускорением a .

К каждой частице жидкости массы m должны быть в этом случае приложены ее вес $G = mg$ и сила инерции, равная по величине ma . Равнодействующая этих сил направлена к вертикали под углом α .



В этом случае единичная масса жидкости находится под действием силы тяжести $Z = -g$ и горизонтального ускорения силы инерции $X = -a$ (к цистерне приложена сила с ускорением (a), а к жидкости – такая же по величине сила инерции с ускорением ($-a$).



Составляющие массовых сил в этом случае:

$$X = -a; \quad Y = 0; \quad Z = -g,$$

Уравнение Эйлера, учитывая массовые силы, примет вид

$$\rho(Xdx + Ydy + Zdz) = dp. \quad \longrightarrow \quad dp = -\rho a dx - \rho g dz.$$

Переменные в уравнении разделены. Интегрируя его, получим

$$p = -\rho a x - \rho g z + C,$$

где C — постоянная интегрирования, определяемая из граничных условий, $p = p_0$ при $x = 0$ и $z = 0$.

Отсюда $p_0 = C$.

И окончательно

$$p = p_0 - \rho a x - \rho g z.$$

Если поверхности жидкости свободна, т.е. $p = p_0$, уравнение примет вид

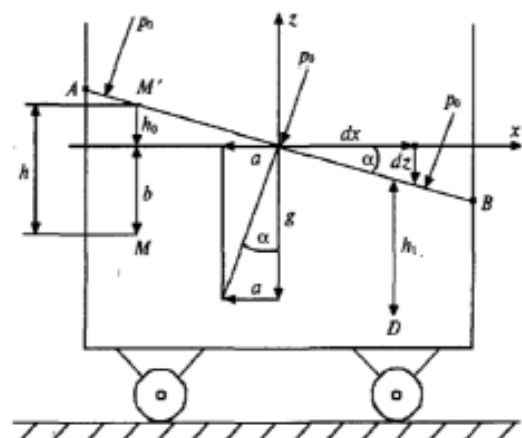
$$-\rho a x - \rho g z = 0. \quad \longrightarrow \quad z = -\frac{a}{g} x.$$

Так как a/g является константой, полученное уравнение будет уравнением прямой линии.

Это означает, что плоскость, проведенная через оси x и z , будет пересекать наружную поверхность жидкости по линии AB .

Отношение a/g представляет тангенс угла наклона прямой AB к горизонтальной плоскости

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{a}{g}. \quad \longrightarrow \quad \alpha = \operatorname{arctg} \left(-\frac{a}{g} \right).$$



Учитывая, что величина этого угла зависит только от ускорений, приходим к выводу, что положение свободной поверхности не будет зависеть от рода находящейся в цистерне жидкости.

Любая другая поверхность уровня в жидкости также будет плоскостью, наклоненной к горизонту под углом α .

Если бы движение цистерны было не равноускоренным, а равнозамедленным, направление ускорения изменилось бы на обратное, и наклон свободной поверхности обратился бы в другую сторону.

Кроме того, *давление в любой точке жидкости, движущейся вместе с емкостью прямолинейно и равноускоренно, определяется по формуле гидростатического давления,*

$$p = p_0 + \gamma h.$$

где h - глубина погружения точки под поверхностью жидкости.

Например, давление в точке D будет $p_D = p_0 + \gamma h_1.$

Задача 1.1

Определить полное гидростатическое и манометрическое давление на дне сосуда, наполненного водой. Сосуд сверху открыт, давление на свободной поверхности атмосферное. Глубина воды в сосуде $h=1,2$ м.

Решение. Полное гидростатическое давление в точке определяется зависимостью

$$p = p_{\text{ат}} + \gamma h.$$

В системе СИ:

$$p_{\text{ат}} = 98\,100 \text{ Па}, \quad \gamma = 9\,810 \text{ Н/м}^3,$$

$$p = 98\,100 + 9\,810 \cdot 1,2 = 109\,872 \text{ Па} = 109,872 \text{ кПа}.$$

В системе МКГСС:

$$p_{\text{ат}} = 10\,000 \text{ кгс/м}^2, \quad \gamma = 1\,000 \text{ кгс/м}^3,$$

$$p = 10\,000 + 1\,000 \cdot 1,2 = 11\,200 \text{ кгс/м}^2.$$

Во внесистемных единицах:

$$p_{\text{ат}} = 1 \text{ кгс/см}^2, \quad \gamma = 0,001 \text{ кгс/см}^3,$$

$$p = 1 + 0,001 \cdot 120 = 1,12 \text{ кгс/см}^2.$$

Манометрическое давление на дне сосуда определяется как разность между полным гидростатическим давлением и атмосферным (1-11):

$$p_{\text{м}} = p - p_{\text{ат}} = \gamma h.$$

В системе СИ:

$$p_m = 109\,872 - 98\,100 = 11\,772 \text{ Па} = 11,772 \text{ кПа.}$$

В системе МКГСС:

$$p_m = 11\,200 - 10\,000 = 1\,200 \text{ кгс/м}^2.$$

Во внесистемных единицах:

$$p_m = 1,12 - 1 = 0,12 \text{ кгс/см}^2.$$

Задача 1.2

Определить полное гидростатическое давление и вакуум в точке, расположенной на глубине $h=0,5$ м в сосуде с нефтью ($\delta_\gamma=0,8$). Давление на свободной поверхности жидкости $p_0=0,9$ кгс/см².

Решение. Согласно (1-10) полное гидростатическое давление в точке определяется по формуле

$$p = p_0 + \gamma h.$$

В системе СИ:

$$p = 0,9 \cdot 98\,100 + 0,8 \cdot 9\,810 \cdot 0,5 = 92\,214 \text{ Па} = 92,214 \text{ кПа}.$$

В системе МКГСС:

$$p = 0,9 \cdot 10\,000 + 0,8 \cdot 1\,000 \cdot 0,5 = 9\,400 \text{ кгс/м}^2.$$

Во внесистемных единицах:

$$p = 0,9 + 0,8 \cdot 0,001 \cdot 50 = 0,94 \text{ кгс/см}^2.$$

Давление в рассматриваемой точке меньше атмосферного. Величина вакуума определяется по формуле (1-13)

$$p_{\text{вак}} = p_{\text{ат}} - p.$$

В системе СИ:

$$p_{\text{вак}} = 98\,100 - 92\,214 = 5\,886 \text{ Па} = 5,886 \text{ кПа}.$$

В системе МКГСС:

$$p_{\text{вак}} = 10\,000 - 9\,400 = 600 \text{ кгс/м}^2.$$

Во внесистемных единицах:

$$p_{\text{вак}} = 1 - 0,940 = 0,060 \text{ кгс/см}^2.$$

Задача 3.1

В боковую стенку сосуда A , наполненного водой, вставлена пьезометрическая трубка B (рис. 41).

Определить абсолютное давление p на свободной поверхности жидкости в сосуде, если под действием этого давления вода в трубке поднялась на высоту $h = 1,5$ м.

Давление на свободной поверхности жидкости в сосуде равняется давлению в сечении a пьезометра и определяется по основному уравнению гидростатики (2.4)

$$p = p_0 + \gamma h.$$

Отсюда, имея в виду, что давление на свободной поверхности $p_0 = p_{\text{атм}} = 1 \text{ кг/см}^2$, а удельный вес воды $\gamma = 1000 \text{ кг/м}^3 = 0,001 \text{ кг/см}^3$, получаем:

$$p = 1 + 0,001 \cdot 150 = 1,15 \text{ ата (кг/см}^2\text{)}.$$

Задача 3.2

В сечениях 1 и 2 горизонтального трубопровода, по которому перекачивается керосин, присоединены трубки дифферен-

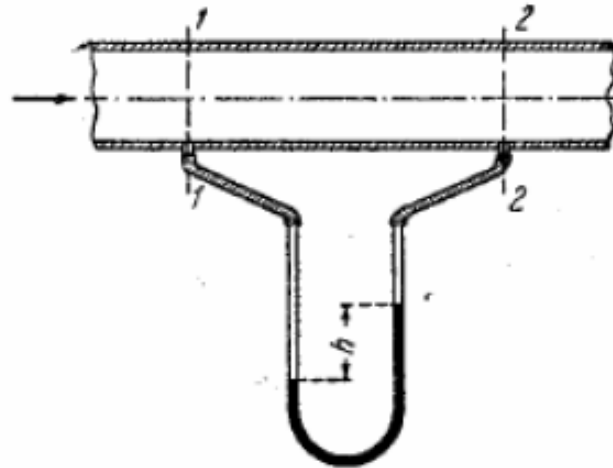


Рис. 42.

циального ртутного манометра (рис. 42). Определить разность давлений в указанных сечениях, если разность уровней в двух коленах манометра $h = 20$ см, удельный вес керосина $\gamma_1 = 0,00083$ кг/см³, удельный вес ртути $\gamma_{рт} = 0,0136$ кг/см³.

Искомая разность давлений (см. стр. 45)

$$p_1 - p_2 = (\gamma_{рт} - \gamma_1) h = (0,0136 - 0,00083) 20 = 0,255 \text{ ат} \left(\frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right).$$

Задача 3.4

Два открытых сообщающихся сосуда A и B (рис. 44) заполнены жидкостями удельного веса $\gamma_1 = 0,9 \text{ Г/см}^3$ и $\gamma_2 = 1 \text{ Г/см}^3$.

Определить положение плоскости раздела жидкостей относительно уровней в сосудах, если разность уровней в них $h = 10 \text{ см}$.

Давление в плоскости раздела двух жидкостей по основному уравнению гидростатики (2.4')

$$p_a = p_{\text{атм}} + \gamma_1 H_A = p_{\text{атм}} + \gamma_2 H_B$$

С другой стороны, по чертежу имеем:

$$H_A = H_B + h.$$

Совместное решение этих уравнений приводит к следующим результатам:

$$H_B = \frac{\gamma_1}{\gamma_2 - \gamma_1} h = \frac{0,9}{1 - 0,9} \cdot 10 = 90 \text{ см};$$

$$H_A = \frac{\gamma_2}{\gamma_2 - \gamma_1} h = \frac{1}{1 - 0,9} \cdot 10 = 100 \text{ см}.$$

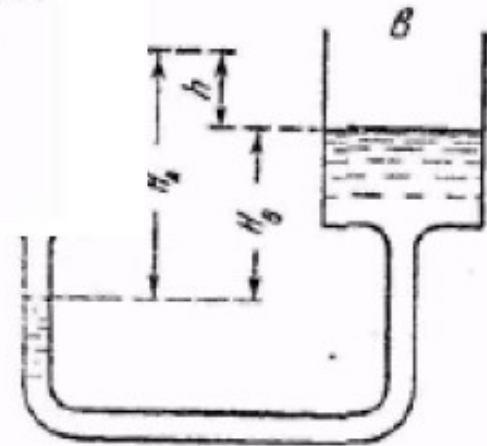


Рис. 44.