

**Краткое пособие по теме «Механика жидкостей и газов»
для учащихся Заочной школы (8 класс. Основной уровень).
2018 – 19 уч. год**

Введение.

Содержание данного пособия основано на материале «Элементарного учебника физики» Г.С. Ландсберга и учебника А.В. Перышкина «Физика 7 класс».

Цель настоящего пособия (как и всех занятий в Заочной школе) – дать вам путеводную нить в вашем стремлении лучше изучить физику, в том числе повысить свой уровень в решении задач. При этом ни в коем случае нельзя ограничиваться рамками данного пособия. Тем, кто хочет понять окружающий мир, только разные источники дадут возможность почерпнуть достаточное количество информации, чтобы иметь полное представление об окружающей нас реальности и происходящих в ней процессах.

Область физики «Механика жидкостей и газов» изучает поведение водной и воздушной среды, что позволяет применять полученные знания для успешного развития авиации и мореплавания. Кроме того, она рассматривает и явления, существенно влияющие на жизнь человека. Такие «грозные явления природы» как тайфуны, цунами, ураганы, смерчи и т.п. всегда интересовали людей из-за той разрушительной силы, с которой они демонстрируют мощь стихий, неподвластных человеку. До сих пор в этих явлениях остается много загадочного для нас, мы не можем предсказать их появление и силу воздействия.

В данном пособии мы будем рассматривать поведение водной и воздушной стихии в тех явлениях, которые нам хорошо знакомы.

Занятие № 1.

ГИДРОСТАТИКА.

Давление, способы его измерения. Изменение давления с высотой.

Закон Паскаля.

Давление, способы его измерения.

Самым главным свойством жидкости, отличающим ее поведение от твердых тел, является *текучесть*. Ничтожный наклон сосуда с водой приводит из-за действия силы тяжести к перетеканию воды таким образом, что ее поверхность снова становится строго горизонтальной. Небольшого усилия достаточно, чтобы оттолкнуть тяжелую лодку от берега. Малейший ветерок вызывает рябь на поверхности пруда. Все эти явления говорят нам о том, что части жидкости могут свободно скользить одна относительно другой при выведении жидкости из равновесия внешним воздействием, направленным вдоль поверхности жидкости. Если же жидкость покоится (находится в равновесии), то ни между слоями жидкости, ни между жидкостью и стенками сосуда не существует сил, направленных по касательной к поверхности жидкости. Поэтому *свободная поверхность покоящейся жидкости всегда горизонтальна*. Пользуясь языком механики, можно утверждать, что *в покоящейся жидкости отсутствуют силы трения*. (Заметим, что в движущейся жидкости между ее слоями возникают силы, обусловленные свойством жидкости, которое называют *вязкостью*.)

Когда жидкость соприкасается с неподвижным твердым телом (стенки сосуда, дно океана, корпус корабля), возникают силы, действующие на поверхность твердого тела, которые мы называем *силами давления жидкости*. Согласно 3-ему закону Ньютона с такими же силами твердое тело действует на жидкость. (Один из основных законов механики – 3-ий закон Ньютона - утверждает следующее. «Силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по величине и направлены вдоль одной прямой в противоположные стороны.»)

Силы давления всегда направлены перпендикулярно поверхности соприкосновения жидкости и твердого тела в данной точке.

С проявлением действия сил давления жидкости мы сталкиваемся постоянно: именно силы давления позволяют нам (и кораблям) плавать в воде, и эти же силы могут раздавить корпус подводной лодки на большой глубине.

В твердых телах при попытке изменить их размер и форму возникают силы упругости. Силы упругости появляются в ответ на деформацию тела. Силы давления жидкости – это тоже силы упругости. В жидкости при изменении *формы* силы упругости не возникают (текучесть). По отношению же к изменению её *объема* жидкость обладает упругостью. Поэтому, если жидкость действует на соприкасающиеся с ней тела, то, значит, она сжата. Чем больше сжата жидкость, тем больше и возникающие в ней силы давления.

Часто можно встретить расхожее утверждение, что «жидкости несжимаемы». Действительно, на глаз сжимаемость жидкости заметить невозможно, но существуют способы измерения этой сжимаемости. Для воды, например, увеличение давления на одну атмосферу ведет к уменьшению объема на 0,005%.

В дальнейшем изложении материала и при решении задач мы будем помнить, что силы давления в жидкости возникают вследствие различной степени ее сжатия. Однако, поскольку в количественном выражении само это сжатие очень мало, мы будем считать плотность жидкости постоянной, а жидкость «несжимаемой».

Силы давления со стороны жидкости на поверхность твердого тела распределены по всей поверхности соприкосновения. Поэтому сила давления на данную поверхность зависит не только от степени сжатия жидкости, но и от размеров этой поверхности. Для того чтобы охарактеризовать распределение сил давления вдоль поверхности соприкосновения, вводят понятие *давления*.

Давлением на участке поверхности называют отношение силы давления, действующей на этот участок, к площади участка:

$$P = \frac{F}{S}.$$

Единицей давления называют такое давление, при котором на единицу площади равномерно действует сила, равная единице. В системе СИ такая единица названа *паскалем* (в честь Б. Паскаля).

$$1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

Для измерения давления в различных точках жидкости служат различные *манометры*. Простейший *мембранный манометр* устроен следующим образом. Пустая камера закрывается герметично тонкой упругой мембраной, соединенной со стрелкой, вращающейся вокруг оси. При помещении манометра в жидкость мембрана прогибается

под действием сил давления, соответственно, стрелка поворачивается, и ее положение может быть отмечено по шкале. Прогиб мембраны тем больше, чем больше давление в данном месте жидкости. Для того чтобы показания манометра относились к малой области жидкости, размеры мембраны должны быть достаточно малы.

Если манометр с такой малой мембраной поместить внутри жидкости, то можно заметить, что при поворачивании манометра в разных направлениях его показания не меняются. Это означает, что давление представляет собой такую характеристику состояния жидкости в данном месте, которая не зависит ни от размеров, ни от ориентации площадки, на которой давление измеряется. *Давление зависит лишь от степени сжатия жидкости в данном месте.*

Если мы хотим узнать, с какой силой действует жидкость на поверхность находящегося в ней тела, сначала нужно найти величину силы, действующей на каждый кусочек его поверхности. Если площадь кусочка поверхности равна ΔS , то сила, действующая на поверхность тела в данном месте, равна $F = P \cdot \Delta S$ и направлена перпендикулярно поверхности. (Знаком Δ мы будем пользоваться для обозначения части какой-либо величины). Силу, действующую на всю поверхность, можно найти как сумму (равнодействующую) сил, действующих на все кусочки поверхности.

Пример действия сил давления: Будет ли перемещаться внутри прямоугольной трубы шириной AB поршень $ABCD$ (см. рисунок), если давление жидкости справа и слева от поршня одинаково?

Пусть S_{AB} и S_{CD} – площади соответствующих граней поршня. Тогда слева на поршень действует сила F_1 , перпендикулярная грани AB : $F_1 = P \cdot S_{AB}$, $F_1 \perp AB$. Соответственно, справа на поршень действует сила $F_2 = P \cdot S_{CD}$, $F_2 \perp CD$

Разложим вектор силы F_2 на две составляющих – силу, направленную вдоль оси трубы (F_{II}), и силу, направленную перпендикулярно оси и стенке трубы (F_{I}).

Из рисунка видно, что $F_{II} / F_2 = AB / CD = S_{AB} / S_{CD}$.

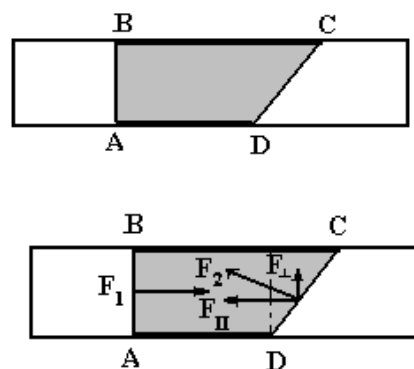
Отсюда получаем: $F_{II} = F_2 \cdot S_{AB} / S_{CD} = P \cdot S_{AB} = F_1$.

Таким образом, как справа, так и слева на поршень действуют одинаковые по величине силы, и перемещаться он не будет.

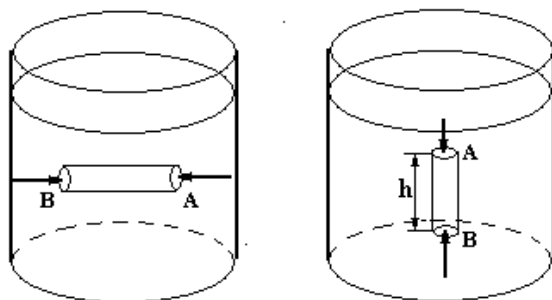
Заметим, что независимо от формы боковых поверхностей поршня, при равенстве давлений с обеих сторон поршень перемещаться не будет.

Изменение давления с высотой.

Рассмотрим находящуюся в некотором сосуде жидкость. Ее свободная поверхность, как уже упоминалось, горизонтальна. Выделим внутри жидкости небольшой объем в виде прямого узкого горизонтального цилиндра. Очевидно, что он находится в равновесии. Вдоль горизонтальной оси цилиндра действуют только силы давления на основания цилиндра со стороны окружающей жидкости $P_A \cdot S$ и $P_B \cdot S$. Т.к. цилиндр находится в



равновесии, то эти силы равны друг другу, а поскольку площади оснований одинаковы, то одинаковы и давления вблизи оснований цилиндра: $P_A = P_B$. Поскольку цилиндр мы выбирали произвольно, можно утверждать, что во всех точках одной и той же горизонтальной плоскости давления равны между собой. Другими словами, горизонтальные плоскости в жидкости – это *поверхности равного давления*. Их иногда называют *поверхностями уровня*. Свободная поверхность жидкости – это тоже поверхность уровня. В открытом сосуде давление во всех ее точках равно атмосферному.



Выделим теперь внутри жидкости небольшой объем в виде прямого узкого *вертикального* цилиндра с основаниями площадью S . Очевидно, что он тоже находится в равновесии. Пусть A и B – точки на пересечении оси цилиндра с верхним и нижним основаниями. Вдоль вертикальной оси цилиндра на него действуют силы давления со стороны окружающей жидкости: $P_A \cdot S$ – вниз, и $P_B \cdot S$ – вверх. Помимо этих сил на жидкость внутри цилиндра действует сила тяжести $mg = \rho ghS$, где h – высота цилиндра, т.е. расстояние по вертикали между точками A и B . Т.к. цилиндр находится в равновесии, должно выполняться условие: $P_A \cdot S + \rho ghS = P_B \cdot S$. Из этого соотношения следует, что *разность давлений в двух точках внутри жидкости зависит от разности глубин погружения этих точек*:

$$P_B - P_A = \rho gh.$$

Если точка A находится на поверхности жидкости, где давление равно атмосферному, то на глубине h давление будет больше на величину ρgh . Это дополнительное давление обусловлено тем, что на жидкость действует сила тяжести, и силы давления уравнивают вес столба жидкости. Давление, вызванное действием силы тяжести на жидкость, носит название *гидростатического давления*. Окончательно: *давление в жидкости на глубине h есть*

$$P(h) = P_0 + \rho gh, \text{ где } P_0 \text{ – давление на поверхности жидкости.}$$

Если рассматривать жидкость в открытом сосуде, следует принимать во внимание следующий факт. На дно и стенки *открытого пустого* сосуда снаружи и внутри сосуда действуют силы атмосферного давления, которые полностью компенсируются. Эти силы продолжают действовать и в том случае, когда сосуд заполняется жидкостью, поэтому в *открытом сосуде* силы давления на дно и стенки сосуда вызваны только *гидростатическим давлением* жидкости. *Давление жидкости на дно сосуда не зависит от его формы, а определяется только высотой столба жидкости и ее плотностью*

$$P = \rho gh.$$

По этой же формуле вычисляется и давление на стенки открытого сосуда, если в качестве величины h взять высоту столба жидкости от данного места стенки до поверхности жидкости.

Сообщающиеся сосуды

Как было показано выше, на одном горизонтальном уровне давление в жидкости одинаково и совершенно не зависит от формы сосуда, в котором находится жидкость. Это проявляется и в так называемом «принципе *сообщающихся сосудов*».

Если два или больше открытых сосудов, содержащих одну и ту же жидкость, соединяются между собой так, что жидкость может свободно перетекать из одного сосуда в другой, то во всех сосудах поверхность жидкости будет находиться на одном и том же уровне. Наливая воду из чайника, мы используем именно этот принцип: при наклоне чайника его носик опускается ниже уровня воды в чайнике, и вода начинает выливаться.

Принцип сообщающихся сосудов используют и в шлюзовых камерах каналов при проходе судов из одного водоема в другой, если они находятся на разных уровнях. В смежных шлюзовых камерах, отделенных друг от друга шлюзовыми воротами, вода стоит на разных уровнях. Под воротами проходит канал, соединяющий обе камеры, который можно открывать и закрывать. При открывании канала обе камеры превращаются в сообщающиеся сосуды, и вода устанавливается в них на одном уровне. Тогда шлюзовые ворота открывают и переводят судно из одной камеры в другую. Затем первые ворота закрывают и открывают следующие ворота, при этом выравнивается уровень воды в камере с уровнем воды в водоеме.

На принципе сообщающихся сосудов основано и действие *жидкостного манометра*, предназначенного для измерения давлений, отличающихся от атмосферного на небольшую величину.

Жидкостный манометр делают в виде U-образной трубки, заполненной небольшим количеством жидкости (воды или ртути). Одно колено трубки открыто, а другое присоединяется к сосуду, давление в котором необходимо измерить. Разность уровней жидкости в коленах на высоту h соответствует

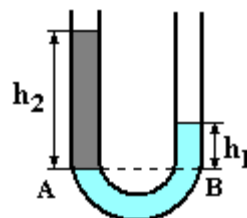
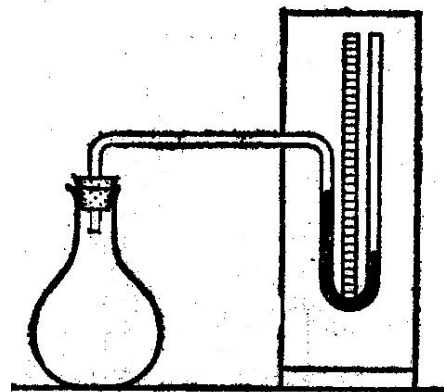
разности давлений на величину ρgh . Часто давление выражают непосредственно в единицах длины – в миллиметрах ртутного столба или миллиметрах водяного столба.

Все выше сказанное относится к ситуации, когда в сообщающихся сосудах находится только *одна* жидкость. Рассмотрим случай, когда в сосуде находятся две *несмешивающиеся* жидкости.

Пусть в правое колено U-образной трубки налита жидкость с плотностью ρ_1 (например, вода), а в левое колено – жидкость с плотностью ρ_2 , ($\rho_2 < \rho_1$) (например, керосин). Эти жидкости не смешиваются друг с другом, поэтому будет существовать граница раздела – плоскость АВ. Ниже плоскости АВ в обоих коленах находится лишь одна жидкость – вода.

Поэтому давление в обоих коленах на уровне АВ одно и то же. Однако, в правом колене оно равно $P_0 + \rho_1 gh_1$, а в левом колене равно $P_0 + \rho_2 gh_2$ соответственно. (P_0 – атмосферное давление). Из равенства давлений на уровне АВ в обоих коленах получаем:

$$\rho_1 gh_1 = \rho_2 gh_2.$$



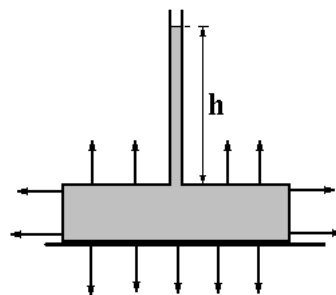
Отсюда следует соотношение высот: $\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$. И так, в сообщающихся сосудах *жидкость с меньшей плотностью создает столб большей высоты над уровнем раздела жидкостей*, и отношение высот обратно отношению плотностей.

Давление жидкости на стенки сосуда. Закон Паскаля.

Изменение давления в жидкости с ростом глубины означает, что и на стенки сосуда жидкость будет давить в разных местах с разной силой. Это наглядно можно продемонстрировать на следующем простом опыте. Наполним водой высокий сосуд, в стенке которого на некоторой высоте проделано небольшое отверстие. Расстояние, на которое будет бить струя воды из этого отверстия, будет постепенно уменьшаться, потому что будет понижаться уровень воды в сосуде, и, следовательно, давление в том месте стенки, где проделано отверстие.

Посмотрим, как будет действовать жидкость на стенки сосуда сложной формы, имеющего широкую нижнюю часть и длинное узкое горлышко.

На рисунке показаны силы, действующие со стороны жидкости на одинаковые по величине участки поверхности сосуда. Эти силы определяются величиной гидростатического давления, которое зависит от высоты h столба жидкости в сосуде. Даже если количество жидкости в высоком горлышке нашего сосуда невелико, оно может создать достаточно большое давление внутри сосуда на его дно и стенки.



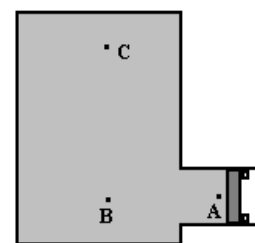
Замечательный опыт продемонстрировал в свое время французский ученый Блез Паскаль (1623-1662). Этот опыт известен в истории физики как «бочка Паскаля».

Плотно законопаченную закрытую крышкой бочку наполнили водой до самого верха через небольшое отверстие в крышке. К этому отверстию в крышке бочки Паскаль присоединил длинную тонкую вертикальную трубку.

Когда Паскаль заполнил трубку водой до высоты нескольких метров (для этого ему потребовались всего несколько кружек воды), возникшие силы давления разорвали бочку.

Этот и многие другие опыты позволили Паскалю сформулировать закон, который носит его имя. Рассмотрим следующую ситуацию.

Заполним полностью водой (или любой другой жидкостью) закрытый сосуд, имеющий узкий горизонтальный цилиндрический отросток площадью S , закрытый закрепленным поршнем. Рассмотрим внутри жидкости три точки – А, В, С. Точка А находится в непосредственной близости к поршню, точка В расположена на одной горизонтали с точкой А, а точка С – на одной вертикали с точкой В и ее высота над точкой В равна h .



Тогда для давлений в этих точках справедливо соотношение:

$$P_A = P_B, \quad P_C = P_B + \rho gh.$$

Подействуем теперь на поршень некоторой силой F . Тогда давление в точке А возрастет на величину $\frac{F}{S}$ и станет равно

$$P'_A = P_A + \frac{F}{S}.$$

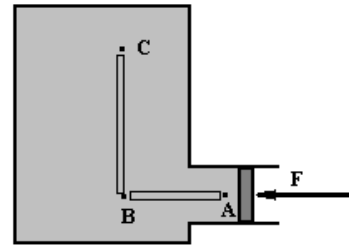
Поскольку жидкость покоится, давление в точке В должно быть равно давлению в точке А, т.е. $P'_B = P'_A = P_A + \frac{F}{S}$.

Значит, новое давление $P'_B = P_B + \frac{F}{S}$. Соответственно, в точке С

$$P'_C = P'_B - \rho gh = P_B + \frac{F}{S} - \rho gh = P_C + \frac{F}{S}.$$

Мы видим, что действие силы F со стороны поршня на жидкость приводит к увеличению давления в выбранных нами точках на одну и ту же величину $\frac{F}{S}$. Поскольку точки В и С внутри жидкости были выбраны произвольно, можно утверждать, что *действие поверхностной силы приводит к увеличению давления во всех точках жидкости на одну и ту же величину*, или, другими словами, *давление, создаваемое поверхностными силами, передается во все точки жидкости без изменения*.

Именно это утверждение и является одной из формулировок закона Паскаля.



Гидравлический пресс.

Закон Паскаля позволяет легко объяснить действие гидравлического пресса. Гидравлические прессы применяются для выжимания масла из семян растений, для штамповки металла и других целей. В качестве жидкости используются вода или масло. Гидравлический пресс состоит из двух цилиндров разных диаметров, снабженных поршнями и соединенных между собой трубкой. Пространство под поршнями заполняется жидкостью.

Пусть к малому поршню с площадью сечения S_1 приложена сила F_1 . Эта сила создает под поршнем

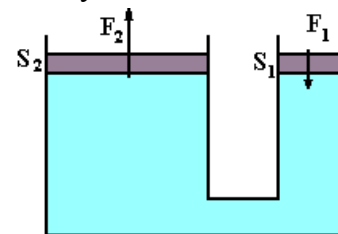
дополнительное давление $P_{\text{доп}} = \frac{F_1}{S_1}$, которое

передается во все точки жидкости, в том числе и в точки под большим поршнем. Это приведет к тому, что на большой поршень со стороны жидкости будет действовать дополнительная сила $F_2 = P_{\text{доп}} S_2 = \frac{F_1}{S_1} S_2$. Значит, на большой поршень будет действовать

сила во столько раз больше, чем на малый, во сколько раз площадь большого поршня больше площади малого: $\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$.

Если при действии силы F_1 малый поршень опустился на расстояние h_1 , то большой поршень поднимется на высоту h_2 .

Вследствие несжимаемости жидкости $h_1 S_1 = h_2 S_2$. Пользуясь соотношением для сил, запишем:



$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{F_1}{F_2}, \text{ или } F_1 h_1 = F_2 h_2.$$

Мы получили соотношение, характерное для простых механизмов, и называемое «золотым правилом механики» - выигрыш в силе ($F_2 > F_1$) сопровождается потерей в пути ($h_1 > h_2$).

На языке физических понятий это означает, что работа силы F_1 на пути h_1 равна работе силы F_2 на пути h_2 .

Примеры решения задач.

Задача № 1. «Сокровища капитана Флинта»

Однажды младший помощник капитана Флинта нечаянно уронил за борт на глубину 4000 м сундук с золотом. Узнав о случившемся, капитан Флинт оказал на своего помощника давление, составляющее одну десятую величины давления, которое испытывает на морском дне сундук с золотом. Найдите, какова была сила перпендикулярного воздействия капитана на поверхность помощника, если площадь их соприкосновения была равна 50 см^2 , плотность морской воды 1030 кг/м^3 , а площадь крышки сундука с золотом никому не известна.

Решение.

Давление P на глубине 4000 м равно сумме атмосферного давления $P_0 = 10^5 \text{ Па}$ и гидростатического давления морской воды ρgh .

$$\rho gh = 1030 \times 9,8 \times 4 \cdot 10^3 \text{ Па.}$$

Получаем $P = 10^5 + 1030 \times 9,8 \times 4 \cdot 10^3 \approx 4 \cdot 10^7 \text{ Па}$.

Величина силы удара находится из соотношения: $F = 0,1PS = 0,1 \times 4 \cdot 10^7 \times 5 \cdot 10^{-3} = 20 \cdot 10^3 \text{ Н}$.

Такая величина силы несколько превосходит человеческие возможности, но это был капитан Флинт!

Ответ: $F = 20 \text{ кН}$

Задача № 2. «График»

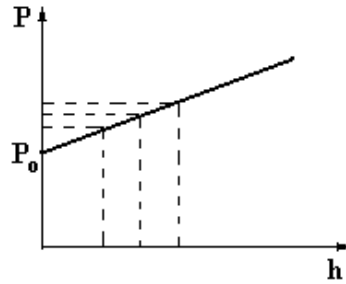
Построить график распределения давления жидкости в сосуде по глубине $P(h)$.

Решение.

С увеличением глубины давление в жидкости растет по закону: $P(h) = P_0 + \rho gh$, где P_0 – давление на поверхности жидкости, ρ – плотность жидкости.

С точки зрения математики давление P есть функция глубины h . Величина h является аргументом функции P , и, в соответствии с правилами математики, на графике величина h откладывается по горизонтальной оси (оси абсцисс), а величина P – по вертикальной оси (оси ординат). На оси абсцисс глубина $h = 0$ соответствует поверхности жидкости. При этом давление на поверхности равно P_0 .

Заметим, что при увеличении глубины на одну и ту же величину Δh давление растет на одну и ту же величину $\Delta P = \rho g \Delta h$. Это означает, что наш график – прямая линия.



Задача № 3. «Аквариум»

В аквариум длиной 50 см и шириной 20 см налита вода до уровня 30 см. Рассчитайте давление воды на дно, силу, действующую со стороны воды на дно и среднюю силу, действующую на стенку шириной 20 см.

Решение.

Давление воды на дно аквариума – это *гидростатическое давление*, поскольку атмосферный воздух одинаково давит со всех сторон на дно и стенки аквариума. Вычислим это давление:

$$P_{\max} = \rho gh \approx 1000 \times 10 \times 0,3 \text{ Па} = 3 \text{ кПа.}$$

Соответственно, сила, действующая на дно сосуда, равна

$$F_1 = PS = \rho ghS = Mg, \text{ где } M \text{ – масса воды. } F_1 = 300 \text{ Н.}$$

Чтобы рассчитать силу, действующую на стенку аквариума, надо учесть, что гидростатическое давление меняется с глубиной по линейной зависимости (см. предыдущую задачу) от нуля до P_{\max} . При этом среднее значение давления будет равно среднему арифметическому $P_{\text{ср}} = P_{\max}/2$, а средняя сила будет равна

$$F_{\text{ср}} = (P_{\max}/2)hd = 1500 \times 0,3 \times 0,2 = 90 \text{ Н.}$$

Ответ: Давление воды на дно $P_{\max} = 3 \text{ кПа}$

Сила, действующая на дно сосуда $F_1 = 300 \text{ Н}$

Средняя сила давления на стенку $F_{\text{ср}} = 90 \text{ Н.}$

Задача № 4. «U-образная трубка»

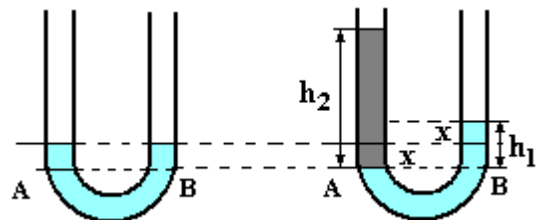
В левое колено U-образной трубки с водой долили слой керосина высотой 20 см. На сколько поднимется уровень воды в правом колене?

Плотность воды $\rho_1 = 1 \text{ г/см}^3$, плотность керосина $\rho_2 = 0,8 \text{ г/см}^3$.

Решение.

Нарисуем первоначальную трубку с водой и ту же трубку после доливания керосина. Заметим, что объем воды остался неизменным, а сечения трубки в обоих коленах одинаковы.

Поэтому можно утверждать: на сколько опустился уровень воды в левом колене, на такую же величину он поднялся в правом колене. Обозначим эту величину «х». Как видно из рисунка, $x = h_1/2$.



Как было показано ранее, в сообщающихся сосудах $\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$. Отсюда получаем

окончательное выражение $x = \frac{h_2 \rho_2}{2 \rho_1} = 10 \cdot 0,8 = 8$ см.

Ответ: $x = \frac{h_2 \rho_2}{2 \rho_1} = 8$ см.