

резким увеличением их лобового сопротивления и уменьшением подъемной силы; гидравлические машины и гребные винты при наличии кавитации работают с малым коэффициентом полезного действия. Если кавитация происходит вблизи стенки, то под действием давлений ударного характера и повышенного содержания кислорода в воздухе, растворенном в воде (34% кислорода по сравнению с 21% в атмосферном воздухе), начинается коррозия и разрушение материала стенки. Разрушение от ударов при образовании пузырей зависит от состояния поверхности стенки: наиболее стойкими оказываются гладкие стенки, наименее стойкими — шероховатые.

Необходимо иметь в виду, что минимальное давление в жидкости, а следовательно, и начало кавитации зависят от температуры. Минимальное давление определяется упругостью насыщенных паров данной жидкости; чем больше температура жидкости, тем больше давление ее насыщенных паров, а следовательно, и давление p_{\min} , при котором начинается кипение жидкости. Так, например, для воды при температуре 60°C $p_{\min} = 2028 \text{ кг/м}^2$, при температуре 80°C $p_{\min} = 4828 \text{ кг/м}^2$; тогда как, например, при 15°C $p_{\min} = 180 \text{ кг/м}^2$.

§ 7. Приборы для измерения скорости движения жидкости

Наиболее широко применяемые в настоящее время приборы для измерения скорости движения жидкости основаны на использовании уравнения Бернулли. С помощью этих приборов непосредственно измеряется лишь давление, а скорость затем определяется вычислением по уравнению Бернулли. В каждом из приборов, измеряющих давление, можно выделить две части: приемник давления, который находится в исследуемой точке потока, и регистратор давления, с помощью которого определяется величина давления, полученного приемником.

Мы рассмотрим сначала наиболее употребительные приемники давления.

1. Скоростная трубка. В своем первоначальном виде скоростная трубка (она была предложена Пито еще в 1732 г. для определения скорости движения воды в открытом русле) представляла собой прибор для измерения полного давления в потоке. В соединении с известным из предыдущей главы способом измерения статического давления с помощью пьезометра скоростная трубка позволяет определять динамическое давление, а значит, и скорость потока.

Представим себе, что в движущуюся по горизонтальной цилиндрической трубе жидкость опущена трубка, подобная обыкновенному пьезометру и отличающаяся от него лишь тем, что ее открытый конец изогнут навстречу потоку (рис. 2.17). Таковую трубку мы будем называть трубкой Пито; нетрудно видеть, что давление (статическое) в открытом конце трубки Пито равно сумме статического и динамического давлений в потоке.

В самом деле, некоторое время после погружения трубки внутрь будет проходить жидкость, но как только высота жидкости достигнет величины p/γ , соответствующей давлению p , дальнейшее движение в трубке прекратится, и скорость в открытом конце будет оставаться равной нулю. Изогнутый открытый конец трубки Пито представляет собой при этом точку торможения потока, и давление в этой точке равно сумме статического и динамического давлений в потоке:

$$p_0 = p_{\infty} + \frac{\rho v^2}{2}.$$

Если теперь представить себе, что в то же сечение трубопровода помещен обыкновенный пьезометр (рис. 2.18), то его показание

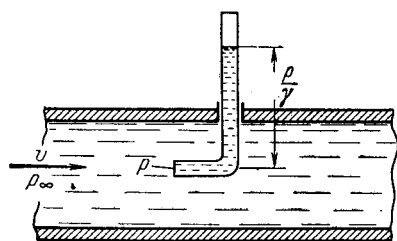


Рис. 2.17. Трубка Пито для измерения полного давления.

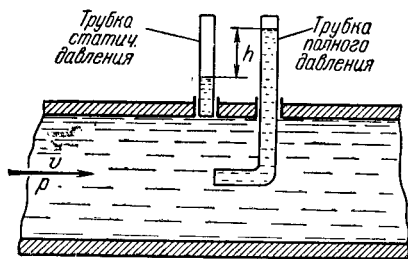


Рис. 2.18. Схема измерения динамического давления в потоке.

позволит определить статическое давление p_{∞} . Зная полное давление в данной точке и статическое, можно вычислить динамическое давление: как разность полного и статического:

$$\frac{\rho v^2}{2} = p_0 - p_{\infty} = h\gamma,$$

где h есть разность уровней жидкости в трубке полного давления и в пьезометре, а γ — объемный вес жидкости.

Отсюда можно определить скорость v , выразив ее непосредственно через наблюдаемую величину h :

$$v = \sqrt{\frac{2h\gamma}{\rho}}.$$

Способ, который первоначально был предложен Пито для измерения скорости безнапорного движения воды, в настоящее время применяется не только для напорного течения капельных жидкостей, но и для газов. В этом последнем случае обе трубки (полного и статического давлений) являются лишь приемниками давления; для отсчета высоты h , т. е. регистраторами давления, они не могут служить. Приходится поэтому при измерении скорости движения газа подводить давления (обычно с помощью резиновых шлангов) к микроманометру и по его шкале отсчитывать h . Следует только иметь в виду, что в этом случае γ есть объемный вес жидкости в микро-

манометре (обычно спирта), а ρ есть плотность среды, скорость которой измеряется (например, воздуха).

В настоящее время имеется ряд конструкций описанного прибора, приспособленных как для лабораторных измерений скорости потока, так и для измерения скорости полета летательного аппарата (точнее, его скорости относительно воздушной среды). Однако в каждой конструкции, как бы удачна она ни была, полное и статическое давления измеряются не вполне точно.

Дело в том, что практически нельзя совместить в одной точке отверстия трубки полного и трубки статического давлений; они должны быть в разных точках, и это является источником погрешности. Далее, размеры и тщательность выполнения приемных отверстий трубок также влияют на их показания. Поэтому для определения скорости прибором, в котором имеются трубка полного и трубка статического давлений, необходимо в предыдущую формулу ввести некоторый поправочный коэффициент ξ , так что формула имеет вид

$$v = \xi \sqrt{\frac{2h\gamma}{\rho}}$$

Коэффициент ξ различен для разных конструкций; он определяется обычно экспериментально путем тарировки данного прибора по другому, принимаемому за эталон. Для хороших конструкций коэффициент ξ лишь на 1—2% отличается от единицы.

Для определения скорости в первом приближении, что иногда приходится делать в лабораторной практике, можно упростить последнюю формулу. Считая $\xi = 1$, плотность воздуха $\rho = 0,125 \text{ кг сек}^2/\text{м}^4$ (что соответствует нормальным лабораторным условиям, т. е. температуре опыта $t = 15^\circ \text{C}$

и барометрическому давлению 760 мм рт. ст.), объемный вес спирта при той же температуре $\gamma = 0,813 \text{ т}/\text{м}^3$, получаем после подстановки этих численных значений в последнюю формулу

$$v = 3,6 \sqrt{h} \text{ м/сек},$$

где h есть высота спиртового столба в микроманометре, выраженная в миллиметрах.

Наиболее распространенной конструкцией скоростной трубки является трубка, изображенная на рис. 2.19. Изогнутый конец трубки

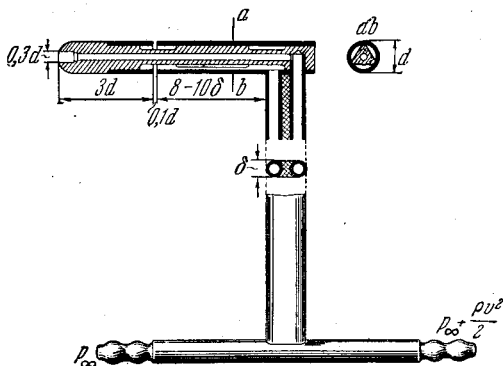


Рис. 2.19. Скоростная трубка для измерения динамического давления.

полного давления окружен здесь металлическим кожухом, вдоль наружной поверхности которого течет набегающий поток. В кожухе имеется прорезь, плоскость которой перпендикулярна к оси трубки. Эта прорезь является приемником статического давления; ее располагают на таком расстоянии от носка трубки, чтобы статическое давление, которое она воспринимает, с достаточной для эксперимента степенью точности было равно статическому давлению в потоке. Распределение давления по поверхности носка скоростной трубки показано на рис. 2.20. Здесь по оси абсцисс отложены абсциссы поперечных сечений носка, а по оси ординат — избыточные давления в этих сечениях. В носовой точке избыточное давление равно $\rho v^2/2$, при удалении от носовой точки быстро убывает,

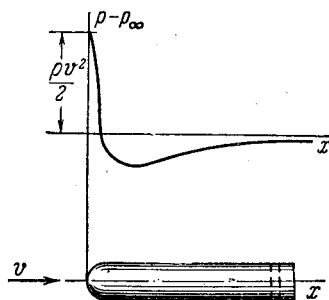


Рис. 2.20. Распределение избыточного давления по поверхности носка скоростной трубки.

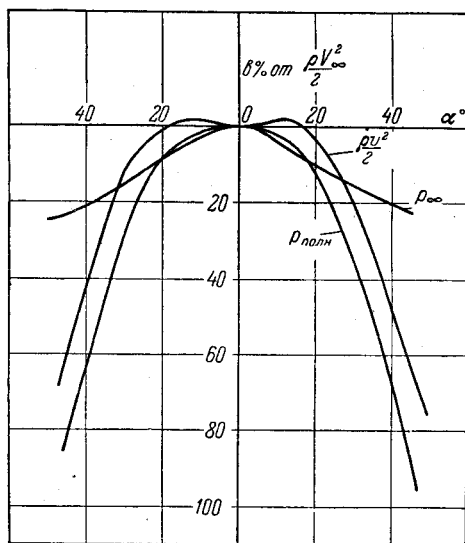


Рис. 2.21. Чувствительность скоростной трубки к изменению угла ее установки по отношению к набегающему потоку.

становится отрицательным и, пройдя через минимум, приближается к нулю. Прорезь для приема статического давления должна находиться в сечении, где избыточное давление достаточно близко к нулю, т. е. p близко к p_∞ . Полное и статическое давления передаются наружу с помощью трубок, заканчивающихся рифлеными насадками (штуцерами), от которых давления передаются на микроанометр резиновыми шлангами.

Особенностью скоростной трубки является ее нечувствительность к малым отклонениям оси носка от направления набегающего потока. На рис. 2.21 изображено изменение полного, статического и динамического давлений, воспринимаемых скоростной трубкой при изменении угла установки трубки (т. е. угла между осью носка и направлением потока). Из графиков видно, что при малых углах установки полное и статическое давления изменяются почти одинаково, так что их разность (динамическое давление) остается почти постоянной в пределах диапазона углов установки $\pm 12^\circ$. Это обстоятельство

позволяет при измерении скорости устанавливать скоростную трубку на глаз, не опасаясь ощутимой погрешности в результате измерения.

2. Трубка Вентури. Наряду со скоростной трубкой для измерения скорости потока можно применить другой приемник давления, который называется трубкой Вентури. Аналогичный прибор служит для измерения расхода жидкости в трубопроводе и называется расходомером Вентури. Он представляет собой участок трубопровода с местным сжатием (см. рис. 2.12); в сжатом сечении устанавливается повышенная скорость и, следовательно, пониженное давление. По величине понижения давления можно определить скорость и расход жидкости в трубопроводе.

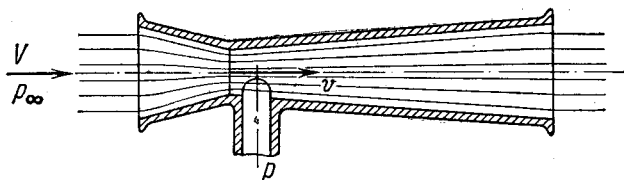


Рис. 2.22. Трубка Вентури.

Трубка Вентури изображена на рис. 2.22. В сжатом сечении трубки имеется отверстие в ее стенке, которое является приемником статического давления p . С помощью резинового шланга давление p передается на микроманометр, который измеряет разность между давлением p в сжатом сечении трубки и атмосферным давлением p_{∞} .

Для того чтобы вывести формулу для скорости при измерении с помощью трубки Вентури, возьмем в струйке, проходящей сквозь трубку, два сечения — входное и сжатое — и запишем для этих двух сечений уравнение Бернулли

$$p_{\infty} + \frac{\rho V_{\infty}^2}{2} = p + \frac{\rho v^2}{2}.$$

Отсюда

$$p_{\infty} - p = \frac{\rho V_{\infty}^2}{2} \left(\frac{v^2}{V_{\infty}^2} - 1 \right).$$

Отношение v/V_{∞} , которое входит в правую часть формулы, можно выразить через отношение площадей сечений: входного S_{∞} и сжатого S ; по уравнению расхода

$$V_{\infty} S_{\infty} = v S,$$

откуда

$$\frac{v}{V_{\infty}} = \frac{S_{\infty}}{S}.$$

Подставляя это выражение в формулу для $p_{\infty} - p$, получаем:

$$p_{\infty} - p = \frac{\rho V_{\infty}^2}{2} \left[\left(\frac{S_{\infty}}{S} \right)^2 - 1 \right].$$

Так как

$$p_{\infty} - p = h\gamma,$$

где h есть высота столба жидкости в микроманометре, то для скорости набегающего потока V_{∞} получается следующее выражение:

$$V_{\infty} = \sqrt{\frac{2h\gamma}{\rho}} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{S_{\infty}}{S}\right)^2 - 1}}.$$

Если ввести поправочный множитель ξ , обусловленный тем, что жидкость в действительности не идеальна, и приемное отверстие для статического давления выполнено неточно, то формула примет вид

$$V_{\infty} = \sqrt{\frac{2h\gamma}{\rho}} \frac{\xi}{\sqrt{\left(\frac{S_{\infty}}{S}\right)^2 - 1}}.$$

Трубка Вентури более удобна, нежели скоростная трубка, в том случае, когда регистратор

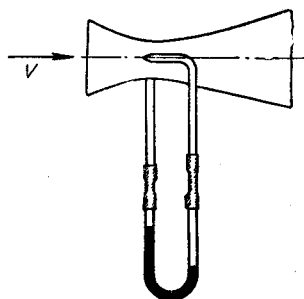


Рис. 2.23. Схема определения скорости с помощью трубки Вентури, соединенной с трубкой полного давления.

давления недостаточно точный или малочувствительный (например, мембранный указатель скорости). Ее преимущество перед скоростной трубкой в этом случае состоит в том, что при одной и той же скорости измеряемая разность давлений может быть для трубки Вентури значительно большей, нежели для скоростной трубки. У скоростной трубки измеряемая разность давлений равна $\rho V_{\infty}^2/2$, тогда как у трубки Вентури она равна $(\rho V_{\infty}^2/2) [(S_{\infty}/S)^2 - 1]$ и при надлежащем выборе площадей сечения трубки может быть сделана в несколько раз большей $\rho V_{\infty}^2/2$.

Еще большую разность давлений при данной скорости потока можно получить, скомбинировав трубку Вентури с трубкой полного давления, как это представлено на схеме (рис. 2.23). В этом случае измеряемая манометром разность давлений равна $(\rho V_{\infty}^2/2) (S_{\infty}/S)^2$.

3. Пространственная скоростная трубка. Приемники давления, о которых до сих пор шла речь, позволяют определить только величину скорости. Для того чтобы одновременно измерить величину и направление вектора скорости, служит так называемая пространственная скоростная трубка.

Пространственная скоростная трубка имеет, кроме приемников полного и статического давлений (как в обыкновенной скоростной трубке), четыре дополнительных приемника давлений, выходные отверстия которых расположены в носке симметрично по отношению

к его оси в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через ось носка (рис. 2.24). Каждые два приемника, выходные отверстия которых расположены на одном диаметре, присоединяются к коленам U-образного микроманометра. Если вектор скорости потока направлен вдоль оси носка скоростной трубки, то, в силу симметрии относительно оси выходных отверстий дополнительных приемников, воспринимаемые ими давления будут равны друг другу, и уровень

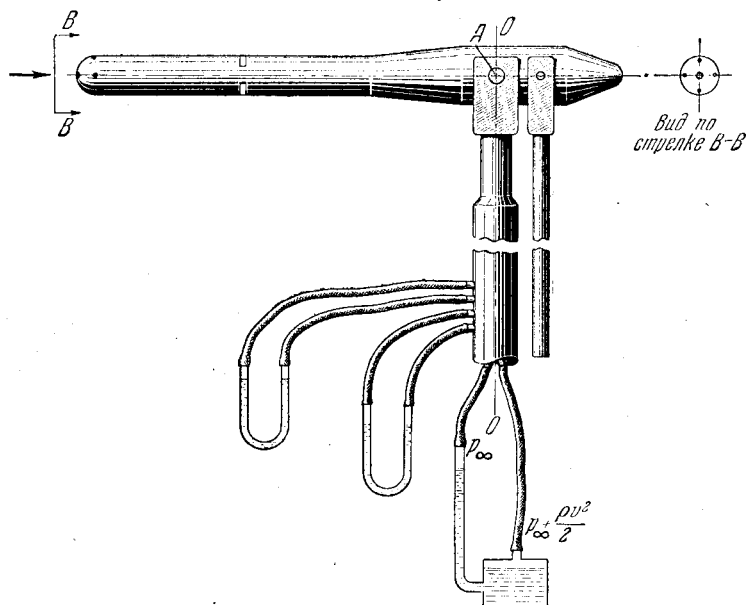


Рис. 2.24. Пространственная скоростная трубка.

жидкости в обоих коленах каждого из двух дополнительных микроманометров должен быть один и тот же. Если вектор скорости направлен под углом к оси, то симметрия обтекания носка нарушается и уровень жидкости в коленах хотя бы одного микроманометра, к которому присоединены дополнительные приемники давления, будет разный. Для определения направления вектора скорости в данной точке нужно иметь возможность ориентировать носок трубки так, чтобы давления в каждой паре дополнительных приемников были равны между собою. С этой целью носок трубки делают поворотным: с помощью червячной передачи он может вращаться относительно оси, проходящей через точку А. Кроме того, вся трубка может вращаться относительно ее продольной оси OO . Угол каждого из этих поворотов фиксируется на соответствующем лимбе. При измерении направления скорости носок и трубку вращают до тех пор, пока не будет достигнуто равенство уровней жидкости в обоих микроано-

метрах, присоединенных к дополнительным приемникам давления. Отсчеты по лимбам определяют тогда углы, составляемые вектором скорости с некоторыми начальными направлениями в каждой из двух взаимно перпендикулярных плоскостей, в которых происходят повороты носка. После того, как достигнута правильная ориентировка пространственной скоростной трубки, величина скорости измеряется так же, как и обычной скоростной трубкой.

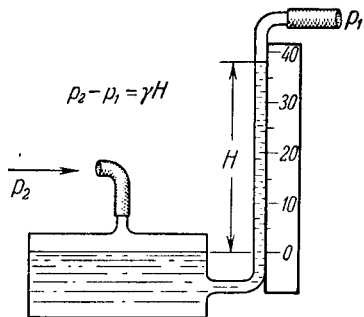


Рис. 2.25. Схема жидкостного микроманометра.

Перейдем теперь к регистраторам давления — микроманометрам. Название микроманометр показывает, что прибор предназначен для измерения малых разностей давления.

1. Микроманометр с наклонной пьезометрической трубкой. Жидкостный микроманометр, который обычно применяется в лабораторных условиях для измерения давления, представляет

собой два сообщающихся сосуда. Один из них выполняется в виде металлического резервуара, а другой — в виде стеклянной трубки

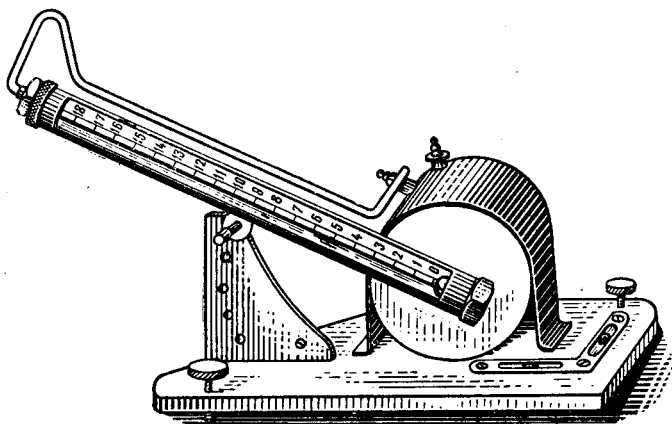


Рис. 2.26. Микроманометр ЦАГИ. Резервуар выполнен в виде кругового цилиндра и может поворачиваться вокруг своей оси вместе с пьезометрической трубкой.

(рис. 2.25). Площадь поперечного сечения резервуара выбирается с таким расчетом, чтобы при переходе жидкости из резервуара в стеклянную трубку и заполнении трубки уровень жидкости в резервуаре не понизился бы больше, чем на величину, равную погрешности при отсчете высоты столба в трубке (обычно 0,5 мм). Такое устройство позволяет считать начало отсчета высоты столба жидкости в

трубке неизменным и не учитывать понижения уровня жидкости в резервуаре. Однако точность такого микроманометра недостаточна, так как в лабораторной практике приходится иметь дело и с измерениями малых разностей давлений. Для того чтобы повысить точность микроманометра, делают стеклянную трубку поворотной. Придавая ей наклон, получают большую длину заполненной жидкостью части трубки, нежели в случае вертикальной трубки при той же разности давлений. Так как абсолютная погрешность при отсчете длины столба жидкости остается неизменной, то относительная погрешность уменьшается во столько раз, во сколько удлинился измеряемый столб. Если обозначить через α угол между осью трубки и горизонтальной плоскостью, через h — измеряемую высоту столба жидкости, а через l — длину столба при наклонном положении трубки, то, очевидно,

$$l = \frac{h}{\sin \alpha}.$$

На рис. 2.26 изображен микроманометр ЦАГИ с наклонной пьезометрической трубкой. Точность определения высоты h с помощью этого микроманометра достигает десятых долей миллиметра, что является вполне достаточным для обычных измерений, которые выполняются в аэродинамических лабораториях. Следует, однако, иметь в виду, что наклон пьезометрической трубки ограничен; при малых значениях α мениск в трубке получается вытянутым и размытым, и наблюдения становятся неточными.

2. Микроманометр с оптическим приспособлением для отсчета. Для более точного измерения разности давлений, нежели это может быть достигнуто с помощью микроманометра с наклонной пьезометрической трубкой, применяется микроманометр, схематично изображенный на рис. 2.27. Пьезометрическая трубка в этом микроманометре вертикальна, а высокая степень точности отсчета высоты столба жидкости достигается с помощью оптического приспособления, которое состоит из луны и вогнутого зеркала, имеющих общую оптическую ось и укрепленных на общей каретке, как показано на рис. 2.27. Каретка с помощью микрометрического винта может передвигаться вверх и вниз. Если каретка находится на уровне мениска

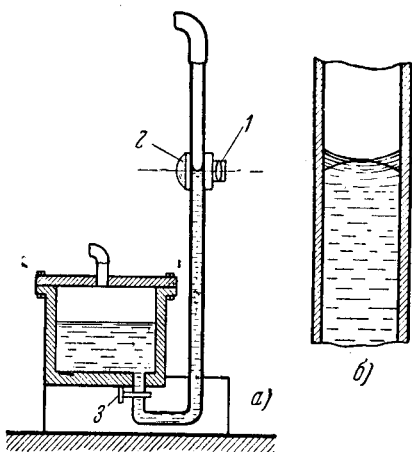


Рис. 2.27. а) Схема микроманометра с оптическим приспособлением для отсчета высоты столба жидкости: 1 — луна, 2 — вогнутое зеркало, 3 — кран для отделения жидкости, находящейся в пьезометрической трубке, от жидкости в резервуаре; б) прямое и перевернутое изображения мениска в пьезометрической трубке.

в пьезометрической трубке, то сквозь лупу виден как сам мениск, так и его перевернутое изображение в вогнутом зеркале (рис. 2.27, б). Когда прямое и перевернутое изображения соприкоснутся, то оптическая ось прибора проходит через нижний край мениска. По шкале, вдоль которой скользит каретка, и нониусу отсчитывают высоту столба жидкости до нижнего края мениска. Точность отсчета может достигать при этом сотой доли миллиметра.

В качестве рабочей жидкости в микроманометрах, используемых в практике аэродинамической лаборатории, применяют: для малых разностей давления спирт ($\gamma \approx 800 \text{ кг/м}^3$), для средних разностей давления — тетрабромэтан ($\gamma \approx 3000 \text{ кг/м}^3$), для больших разностей давления — ртуть ($\gamma = 13\,600 \text{ кг/м}^3$).

§ 8. Скорость распространения упругих возмущений в газе (скорость звука)

Прежде чем интегрировать уравнение энергии (2.17) для сжимаемой жидкости, рассмотрим некоторые ее особенности. Представим себе сначала несжимаемую жидкость, находящуюся в длинной трубке и ограниченную поршнями *A* и *B* (рис. 2.28). В силу несжимаемости жидкости всякое перемещение поршня *A* вызовет в тот же момент такое же перемещение поршня *B* (так, как если бы между *A* и *B* было твердое тело). Иными словами, изменения давления, вызванные перемещениями поршня *A*, передаются в несжимаемой жидкости мгновенно, т. е. с бесконечно большой скоростью. Иначе обстоит дело в сжимаемой жидкости. При перемещении поршня перед ним возникает уплотнение, которое

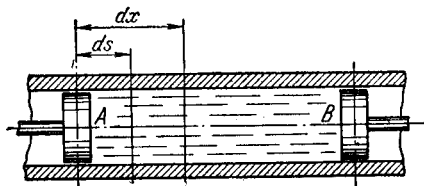


Рис. 2.28. В несжимаемой жидкости возмущения распространяются мгновенно (с бесконечно большой скоростью). В сжимаемой — упругие возмущения распространяются со скоростью $dx/dt = a$.

передвигается вперед с конечной скоростью, зависящей от состояния и свойств жидкости. Вычислим скорость распространения в газе малых (упругих) возмущений.

Пусть за время dt поршень продвинулся на длину ds , а вызванное им возмущение распространилось вдоль трубы на длину dx . Рассматривая газ как упругую среду и применяя к нему известный из предыдущего (гл. I, § 3) закон пропорциональности между изменением давления и относительной деформацией, можно записать, что сила приходящаяся на единицу площади поперечного сечения трубы, равна произведению модуля упругости для газа на относительное удлинение. Так как в движение приведена часть газа длиной (вдоль трубы) dx , а в результате перемещения поршня эта длина умень-