

§ 16.1. Течение жидкостей и газов

1. Раздел физики, в котором рассматривают законы равновесия и движения жидких и газообразных тел, а также их взаимодействия с твердыми телами, называют **гидроаэромеханикой**.

Характерное свойство жидких и газообразных тел — их **текучесть**, т. е. малая сопротивляемость деформации сдвига: если скорость сдвига стремится к нулю, то силы сопротивления жидкости или газа этой деформации также стремятся к нулю. Иными словами, жидкие и газообразные тела не обладают упругостью формы — они легко принимают форму того сосуда, в котором находятся. Вследствие этого *внешнее давление, производимое на жидкость или газ, передается ими во все стороны равномерно (закон Паскаля)*.

2. Движение жидкостей или газов называют **течением**, а совокупность частиц движущейся жидкости или газа называют **потоком**. В гидроаэромеханике отвлекаются от молекулярного строения жидкостей и газов, рассматривая их как сплошную среду, непрерывно распределенную в занятой ею части пространства. При этом различие между жидкостью и газом состоит лишь в том, что плотность ρ первой можно считать не зависящей от давления, в то время как зависимостью плотности газа от давления, т. е. сжимаемостью газа, при больших скоростях течения пренебрегать нельзя. В дальнейшем, ради краткости, мы будем называть газ и жидкость единым термином — жидкость, которую в зависимости от условий задачи будем считать несжимаемой ($\rho = \text{const}$) или сжимаемой ($\rho \neq \text{const}$). Как показывают расчеты, пренебрежение сжимаемостью газов при скоростях течения до 100 м/с приводит к ошибке, не превышающей 5%.

3. Основной метод описания движения жидкости в гидроаэродинамике — **метод Эйлера**, состоящий в задании зависимости значений вектора \mathbf{v} скорости течения жидкости в различных точках пространства от координат этих точек (x, y, z) и времени t :

$$\mathbf{v} = f(\mathbf{r}, t)$$

или

$$\begin{aligned} v_x &= f_1(x, y, z, t), \\ v_y &= f_2(x, y, z, t), \\ v_z &= f_3(x, y, z, t), \end{aligned}$$

где $\mathbf{r} = xi + yj + zk$ — радиус-вектор, проведенный из начала координат в рассматриваемую точку, i, j и k — единичные векторы — орты осей координат, а v_x, v_y и v_z — проекции вектора \mathbf{v} на оси координат.

4. Течение жидкости называют **установившимся**, или **стационарным**, если скорость жидкости в каждой точке пространства, занятого жидкостью, не изменяется с течением времени, т. е. \mathbf{v} не за-

висит от t : $\mathbf{v} = f(\mathbf{r})$. В случае неустановившегося течения \mathbf{v} зависит также и от времени t .

Течение называют **ламинарным**, или **слоистым**, в том случае, если поток представляет собой совокупность слоев, перемещающихся друг относительно друга без перемешивания. Течение называют **турбулентным**, если имеет место перемешивание различных слоев жидкости или газа вследствие образующихся завихрений.

5. В целях наглядности движение жидкости можно изображать с помощью **линий тока**, которые проводят так, что касательные к ним совпадают по направлению с векторами скоростей жидкости в соответствующих точках пространства. В случае стационарного течения линии тока не изменяются с течением времени и совпадают с траекториями отдельных частиц жидкости. Наглядную картину линий тока можно получить на опыте при помощи алюминиевого порошка, добавляемого к текущей жидкости. На фотопленке при фотографировании с небольшой выдержкой каждая крупинка порошка дает черточку, длина которой пропорциональна величине скорости. Примерная картина изображена на рис. 16.1. Она показывает, что наибольшая скорость наблюдается в местах наименьших поперечных сечений потока. Густота линий тока в этих местах наибольшая. Следовательно, линии тока указывают не только направления скоростей, но и позволяют судить о величине скорости частиц в данном месте. Изображая поток, условились проводить линии тока так, чтобы их густота (число линий, пронизывающих единицу площади поверхности, проведенной в потоке перпендикулярно к линиям тока) была бы численно равна скорости частиц потока в данном сечении.



Рис. 16.1.

6. Поверхность, которая образована линиями тока, проведенными через все точки малого замкнутого контура, называют **трубкой тока**. Часть жидкости, ограниченную трубкой тока, называют **струей**. В случае установившегося движения жидкости трубки тока не изменяются с течением времени и представляют для частиц жидкости как бы непроницаемую стенку, так как скорости частиц около этой поверхности направлены по касательной к ней. Поэтому при установившемся течении жидкости частицы движутся так, что каждая из них все время остается в пределах определенной струи.

7. В реальных жидкостях течение усложняется тем, что между отдельными слоями потока происходит внутреннее трение. Однако в ряде случаев влияние внутреннего трения невелико и им можно пренебречь. Жидкость, в которой отсутствует внутреннее трение, называют **идеальной жидкостью**. Опыт показывает, что при течении жидкостей в коротких и достаточно широких трубах и каналах, а также при обтекании жидкостями твердых тел, имеющих удобообтекаемую форму (например, крыла самолета), влияние внутреннего трения проявляется лишь в сравнительно тонком пограничном слое жид-

кости, который непосредственно прилегает к поверхности труб, каналов и обтекаемых тел. Вне пограничного слоя течение реальной жидкости ничем не отличается от течения идеальной жидкости. Поэтому, изучая движение идеальной жидкости, можно установить ряд закономерностей, которые с известным приближением применимы к течению реальных жидкостей. Это приближение тем более точно, чем меньше вязкость жидкости. Вязкость многих жидкостей (например, воды, спирта и др.) в обычных условиях сравнительно невелика, вязкость же газов вообще незначительна.

8. Рассматривая вопросы механики твердого тела, мы пользовались понятием абсолютно твердого (абсолютно недеформируемого) тела, расстояния между частицами которого всегда остаются неизменными. Между абсолютно твердым телом и идеальной несжимаемой жидкостью имеется сходство в отношении объемной деформации и коренное различие в отношении деформации сдвига. Если модуль сдвига абсолютно твердого тела равен бесконечности, то модуль сдвига идеальной жидкости равен нулю.

§ 16.2. Уравнение неразрывности и уравнение Бернулли

1. Рассмотрим участок элементарной струйки жидкости, ограниченной двумя произвольно выбранными нормальными сечениями 1 и 2, площади которых равны dS_1 и dS_2 (рис. 16.2). Скорости

жидкости в этих сечениях обозначим через v_1 и v_2 . Если течение жидкости установившееся, то масса жидкости, заключенной в участке струи между сечениями 1 и 2, не зависит от времени. Следовательно, масса $dm_1 = \rho v_1 \cdot dS_1$ жидкости, поступающей в

рассматриваемый участок за единицу времени сквозь сечение 1, равна массе $dm_2 = \rho v_2 \cdot dS_2$ жидкости, вытекающей из этого участка за то же время сквозь сечение 2:

$$\rho v_1 \cdot dS_1 = \rho v_2 \cdot dS_2. \quad (16.1)$$

Поскольку сечения 1 и 2 выбраны совершенно произвольно, то

$$\rho v \cdot dS = dm_{сек}, \quad (16.2)$$

где ρ и v — значения плотности и скорости жидкости в произвольном поперечном сечении струи площадью dS , а $dm_{сек}$ — секундный массовый расход жидкости, постоянный вдоль струи.

Полученное нами соотношение называют **уравнением неразрывности**. В случае несжимаемой жидкости плотность ρ одина-



Рис. 16.2.