

## ГЛАВА IX

### ОСНОВЫ ГИДРОДИНАМИКИ И АЭРОДИНАМИКИ

#### § 48. Основные понятия и направления гидродинамики

Гидродинамика занимается изучением, во-первых, законов движения жидкости, во-вторых, тех сил, с которыми движущаяся жидкость действует на помещенные в нее тела.

Для выяснения действительной картины движения жидкостей, применяя законы механики, нужно учитывать, кроме проявления инерции частиц жидкости, еще наличие сил внутреннего трения (а для газов при весьма больших скоростях движения, кроме того, — проявление сжимаемости).

Чтобы разобраться в довольно сложной картине движения жидкостей и газов, полезно вначале отвлечься от усложнений, вносимых в эту картину вязкостью и сжимаемостью. Воображаемую жидкость, совершенно несжимаемую и невязкую, называют *идеальной жидкостью*. Поскольку у разных веществ свойства вязкости и сжимаемости выражены не одинаково сильно, то очевидно, что в одних случаях проявления этих свойств могут оказаться существенными, в других случаях — маловажными. Мы увидим, что даже легко сжимаемые газы при не слишком больших скоростях движения ведут себя по отношению к твердому телу, движущемуся в газе, подобно несжимаемой жидкости.

Причиной возникновения сил, действующих на тела, помещенные в движущуюся жидкость, при малых скоростях движения является главным образом трение (вязкость), тогда как при больших скоростях преимущественно сказывается инерция тех частиц жидкости, которые бывают вынуждены изменить свое движение, огибая тело, помещенное на их пути. Величина и направление этих сил (сил вязкости и сил инерции) зависят только от *относительного* перемещения жидкости и находящегося в ней тела.

Чтобы определить силы, вызываемые инерцией жидких масс, необходимо знать траектории и скорости отдельных частиц жидкости до и после того, как тело было внесено в поток. Скорость частиц жидкости в различных участках потока имеет различную величину. Чтобы иметь полное представление о направлении скорости в каждой точке потока, на чертеже, изображающем этот поток, проводят

линии, направление которых в каждой точке совпадает с направлением скорости. Эти линии называют *линиями тока*. Принято проводить линии тока так, чтобы густота их изображала в определенном масштабе величину скорости в том или ином участке потока <sup>1)</sup>.

В случае установившегося течения скорости жидкости в различных точках потока остаются неизменными во времени. В этом случае линии тока совпадают с траекториями отдельных частиц жидкости. Часть потока, ограниченную со всех сторон линиями тока, называют *трубкой тока*.

Линии тока можно сделать видимыми, подмешав к жидкости порошок алюминиевой бронзы или пустив в нее струю краски.

Наблюдая линии тока, можно заметить, что характер течения жидкости в сильной степени зависит от близости стенок сосуда. На распределение скоростей вблизи стенок влияют силы трения и форма

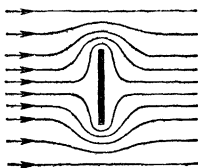


Рис. 84. Течение жидкости, сгибающей помещенную в нее пластинку. Картина, которую видит неподвижный относительно пластинки наблюдатель.

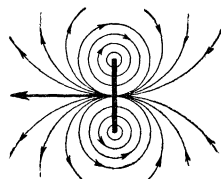


Рис. 85. То же течение, что на рис. 84. Картина, которую видит наблюдатель, неподвижный относительно жидкости.

потока. Вдали от стенок распределение скоростей обуславливается только формой потока. Первый, более сложный случай, называют *течением при трении*, второй — *свободным течением*.

На рис. 84 и 85 изображены линии тока свободного установившегося потока, обтекающего тонкую пластинку, поставленную перпендикулярно к потоку. На рис. 84 изображена картина, которую видит наблюдатель, неподвижный относительно пластинки: частицы жидкости, встретив пластинку, отклоняются от первоначального пути; струи жидкости, охватив пластинку с обеих сторон, замыкаются позади нее. На рис. 85 изображена картина, которую видит неподвижный относительно жидкости наблюдатель, мимо которого проходит пластинка: частицы жидкости, отброшенные вперед и в стороны движущейся пластинкой, огибают ее края и устремляются в пространство, освободившееся позади пластинки. В этом случае линии

<sup>1)</sup> Аналогично с помощью *силовых линий* изображают направление и величину вектора напряженности в любой точке электрического, магнитного или гравитационного полей.

тока очень похожи на силовые линии плоского проводника, заряженного с одной стороны положительным, с другой — отрицательным электричеством. Вследствие этой аналогии, которая легко может быть развита и углублена математически, *свободное течение без вращения макрочастиц (т. е. элементарных объемов жидкости) называют потенциальным течением.*

Если же течение сопровождается вращением макрочастиц жидкости, оно называется *вихревым.*

Учет трения приводит к значительному усложнению уравнений движения жидкости. Кроме того, как будет пояснено ниже, вязкость при определенных скоростях движения порождает своеобразное нарушение устойчивости движения (так называемую турбулизацию всего потока), что делает математический анализ такого рода течения жидкости особенно сложным. Поэтому в первый период своего развития теоретическая гидродинамика ограничивалась исследованием движений идеальной жидкости.

Всемирно признано, что создателем теоретической гидродинамики был петербургский академик Леонард Эйлер<sup>1)</sup>. Отдел теоретической гидродинамики, посвященный вихревому движению в



Леонард Эйлер (1707—1783)

---

<sup>1)</sup> Эйлер обладал необычайной творческой активностью и исключительной работоспособностью. Эти качества сочетались в нем с гениальной математической одаренностью. Научные трактаты Эйлера (объем их огромен — 43 тома, сжатость изложения и разносторонность изумительны) являются величайшим вкладом в науку. В отличие от Ньютона, который хотя и явился вместе с Лейбницем основателем дифференциального и интегрального исчисления, но в механике пользовался геометрическим методом, Эйлер уже в первых своих сочинениях по механике применил аналитический метод и позже постоянно его совершенствовал. Эйлер создал вариационное исчисление, которое явилось основой для разработки обобщенных принципов механики. Классическими являются исследования Эйлера по небесной механике, по определению напряжений и колебаний в упругих стержнях и балках, по теории движения твердых тел, по баллистике и др. Течение идеальной жидкости было математически проанализировано Эйлером в монографии «Общие принципы движения жидкостей», изданной в 1755 г.

идеальных жидкостях, был разработан Гельмгольцем и В. Томсоном (Кельвином).

Гельмгольц, руководствуясь уравнениями Эйлера, доказал (1858 г.), что в идеальной жидкости раз возникшее *вихревое движение* не могло бы исчезнуть. Возникновение и исчезновение вихрей в реальных жидкостях обусловлено силами вязкости. В идеальной жидкости, где нет трения, все частицы жидкости, вовлеченные в вихревое движение, перемещаются вместе с вихрем, причем произведение поперечного сечения вихря на скорость вращения остается постоянным вдоль оси вихря и не изменяется при перемещении вихря в жидкости. В этих замечательных теоремах Гельмгольца отображен закон сохранения момента количества движения в применении к жидкостям. Следует отметить, что вне вихря движение жидкости, возмущаемое вихрем, тем не менее сохраняет потенциальный характер, т. е. макрочастицы жидкости, расположенные вне вихря, не испытывают вращений.

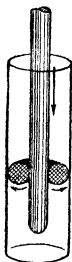


Рис. 86. Модель, поясняющая движение жидкости в кольцевом вихре.

В идеальной жидкости вихри могут оканчиваться только: или на поверхностях, ограничивающих жидкость (на стенках сосуда и на свободной поверхности), или замыкаться в кольцо. Примером вихрей первого рода может служить смерч. Кольцевые вихри можно продемонстрировать, наполнив дымом ящик с круглым отверстием и ударяя по задней упругой стенке ящика молотком. Когда воздух выталкивается из отверстия, внешняя часть выбрасываемой массы воздуха вследствие трения о края отверстия увлекается назад, тогда как внутренняя часть движется вперед, что и приводит к образованию вихря.

Представление о движении жидкости в кольцевом вихре можно получить следующим образом. Представим себе, что внутрь трубки плотно вставлено круглое резиновое кольцо, сквозь которое пройдет стержень (рис. 86). Если вдвигать стержень внутрь трубки, то кольцо будет катиться без скольжения, передвигаясь вперед со скоростью, равной половине скорости стержня.

Казалось бы, что с количественной точки зрения проявлением вязкости во многих случаях можно пренебречь (поскольку вязкость таких жидкостей, как вода, а тем более газов, мала). Однако развитие гидродинамики показало, что картина движения реальных жидкостей обычно в корне отличается от картины движения идеальной жидкости.

Вязкость служит причиной вихреобразований (в особенности при наличии вызванных в потоке жидкости «поверхностей раздела», где скорость изменяется скачком), и поэтому даже малая вязкость может качественно изменить всю картину движения жидкости.

Например, на рис. 84 показано, как происходило бы в потоке жидкости обтекание пластины, если бы жидкость была идеальной и

не существовало бы разрывов непрерывности в изменении скорости. Как было доказано Эйлером, в этом случае пластина, помещенная в поток, не испытывала бы со стороны жидкости суммарно никакой силы, так как давление на ее переднюю поверхность уравновешивалось бы давлением на заднюю поверхность (об этом подробнее сказано ниже, в § 53).

Если предположить, что у краев пластины возможно расслоение жидкости с резким скачком скорости движения смежных слоев, но с сохранением потенциального характера течения, то картина об-

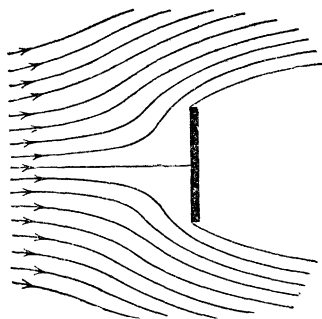


Рис. 87. Разрывное потенциальное течение около пластинки.

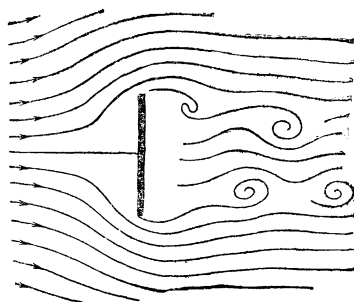


Рис. 88. Истинная картина обтекания пластинки.

текания будет иметь вид, показанный на рис. 87. В этом случае пластина оказывала бы сопротивление движению, но меньше, чем она оказывает в действительности, в 2,27 раза. Истинная картина обтекания имеет вид, показанный на рис. 88; здесь вследствие скачка в скорости движения у кромки пластины на поверхностях расслоения жидкости интенсивно сказывается вязкость жидкости, что в итоге приводит к образованию вихрей, снижающих давление на заднюю поверхность пластины.

Глубокое качественное влияние даже незначительной вязкости на истинную картину движения жидкостей сделало выводы эйлеровой гидродинамики идеальных жидкостей мало применимыми к решению практически важных вопросов. Это стало обнаруживаться уже в первые годы развития теоретической гидродинамики. Поэтому попутно с прогрессом строгих, но в некоторой мере оторванных от действительности математических методов развилось другое, в математическом отношении менее стройное прикладное направление в гидродинамике («гидравлика»), основы которого также были созданы в России Даниилом Бернулли, автором классического трактата «Гидродинамика», изданного в 1738 г.

В последующие годы прикладное направление в гидромеханике поставило своей целью возможно более полный охват фактов в соот-

ношениях, которые по своей простоте были бы пригодны для инженерных расчетов. В прикладной гидромеханике стал господствовать эмпирический метод.

«В классической гидродинамике единственным правилом было логическое построение, и поэтому от нее ускользало все, что не могло быть выведено из исходных уравнений путем математического анализа. Напротив, задачей и целью гидравлики было дать ответ по возможности для каждого отдельного случая практики, не останавливаясь при этом на внутренней связи между отдельными проблемами. Теоретическая гидродинамика стала терять свое значение, так как результаты ее расчетов во многих случаях были прямо противоположны действительности; для возможности математического исследования проблем вводились упрощения (особенно в отношении отсутствия трения), которые в качестве приближений часто были непозволительны. С другой стороны, гидравлика распалась на ряд отдельных проблем. Каждый из все чаще возникающих вопросов решался при помощи специальных экспериментов и путем введения коэффициентов, найденных на основании этих экспериментов. Гидравлика становилась все более и более наукой о коэффициен-



Даниил Бернулли (1700—1782)

тах. В конце XIX и в начале XX в. с обеих сторон возникло к этому критическое отношение и зародилось стремление сблизить и соединить оба разошедшихся в разные стороны научных направления»<sup>1)</sup>.

Необходимость такого синтеза была продиктована возникновением новых областей промышленности — турбостроения и самолетостроения.

Начало новому синтезирующему направлению в гидродинамике было положено трудами Н. Е. Жуковского (с 1896 г.) и Прандтля (с 1904 г.).

<sup>1)</sup> Цитата из книги О. Титъенса «Гидро- и аэродинамика, по лекциям проф. Л. Прандтля», М.—Л., ГТТИ, 1933, стр. 11—12.