

дикулярно к скорости набегающего потока и равная произведению плотности жидкости на скорость потока на бесконечности и на циркуляцию скорости по любому замкнутому контуру, охватывающему обтекаемый цилиндр. Направление подъемной силы получается при этом из направления вектора скорости потока на бесконечности поворотом его на прямой угол против направления циркуляции (рис. 5.112).

§ 47. Значение теоремы Жуковского о подъемной силе. Выводы и следствия из этой теоремы

Теорема Жуковского имеет огромное принципиальное значение для понимания природы подъемной силы; она является также основой для построения всей теории крыла и гребного винта, и в этом состоит ее практическое значение. Мы рассмотрим теперь ряд выводов и следствий из этой теоремы, которые помогут выяснить ее значение.

Теорема Жуковского устанавливает, что при данных плотности жидкости и скорости набегающего потока подъемная сила определяется только величиной циркуляции скорости по контуру, охватывающему крыло. Отсюда следует, что при вычислении подъемной силы можно представить себе крыло замененным одним вихрем, или несколькими вихрями, которые, будучи неподвижно связаны с крылом, создают в потоке такую же циркуляцию скорости по всякому контуру, охватывающему крыло, какую в действительности создает само крыло. Такие вихри Жуковский назвал *присоединенными вихрями*, в отличие от свободных вихрей, которые перемещаются вместе с потоком. Идея замены крыла присоединенными (или несущими) вихрями, которая была впервые сформулирована и развита Жуковским на основе его теоремы, проходит красной нитью через всю теорию крыла и гребного винта.

Принципиальное значение теоремы Жуковского заключается далее в том, что она впервые установила ограниченность так называемого парадокса Даламбера, неправильное понимание которого сильно подрывало доверие практиков к выводам теории. Теорема Жуковского показывает, что причина несоответствия с действительностью парадокса Даламбера заключается в том, что им не учитываются вращения частиц, которые происходят от действия сил трения в непосредственной близости к поверхности тела, т. е. в пограничном слое.

С другой стороны, теорема Жуковского показывает, что не следует искать источник подъемной силы крыла и в срыве струй с передней и задней кромок крыла, и в образовании застойной области за крылом (рис. 5.113), как это предполагалось по струйной теории.

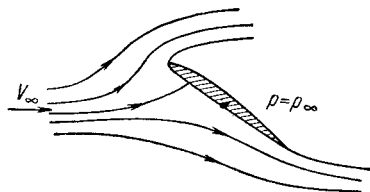


Рис. 5.113. Схема обтекания крыла по струйной теории.

Известно, что отрыв струй от поверхности обтекаемого тела происходит лишь в том случае, если тело неудобнообтекаемо; в частности, отрыв струй от поверхности крыла имеет место, если угол атаки достаточно большой. Что касается до удобнообтекаемых тел, то за ними не образуется застойной области и к ним струйная теория неприменима.

Теорема Жуковского впервые установила действительную причину возникновения подъемной силы при безотрывном обтекании тела потоком несжимаемой жидкости. Этой причиной является вязкость жидкости, которая проявляется в образовании пограничного слоя, состоящего из вращающихся заторможенных частиц. Вращение частиц

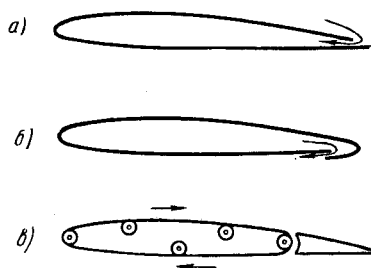


Рис. 5.114. Некоторые способы увеличения циркуляции скорости вокруг профиля крыла: а) схема отсасывания потока вблизи хвостовой точки; б) схема выдувания потока вблизи хвостовой точки; в) схема крыла с движущейся поверхностью.

в пограничном слое вызывает циркуляционное движение вокруг крыла, которое и является источником подъемной силы.

Теорема Жуковского указывает путь, по которому при данной скорости движения может быть достигнуто увеличение подъемной силы крыла: он заключается в увеличении циркуляции скорости по контуру, охватывающему крыло. При этом, как видно из теоремы Жуковского, оказывается безразличным, каким способом достигнуто увеличение циркуляции: увеличением вогнутости профиля, воздействием на пограничный слой или внешний по отношению к нему поток или, например, движением поверхности крыла или части его поверхности, как это изображено на схеме (рис. 5.114).

Теорема Жуковского позволяет объяснить ряд физических явлений. Сюда относятся, например, возникновение подъемной силы (тяги) на вращающихся круговых цилиндрах (роторах), которые находятся в боковом потоке ветра; это явление было подробно рассмотрено в гл. IV. Сам Жуковский применил свою теорему к объяснению и другого явления: наклонного спуска свободно падающих вращающихся пластинок. Оказывается, что если вырезать из картона или плотной бумаги продолговатую пластинку и предоставить ей свободно падать, сообщив предварительно вращательное движение вокруг продольной оси, то такая пластинка будет опускаться не вертикально, а наклонно, планируя в сторону, противоположную направлению вращения, в полном соответствии с теоремой Жуковского. Это явление было впервые объяснено Н. Е. Жуковским, который посвятил ему одну из своих работ ¹⁾.

¹⁾ Жуковский Н. Е., О падении в воздухе продолговатых легких тел, вращающихся около своей продольной оси, Полное собрание сочинений, т. V.

Теорема Жуковского позволяет также объяснить поперечные движения масс жидкости в турбулентном потоке; каждая такая масса, выделившись из окружающей среды и вращаясь, будет испытывать от набегающего на нее потока воздействие подъемной силы и вследствие этого будет удаляться от первоначального направления своего движения. Более подробно это явление будет рассмотрено в следующей главе.

Теорема Жуковского оставляет открытым вопрос о величине циркуляции скорости. Этот вопрос, строго говоря, и не может быть решен средствами теории идеальной жидкости. Так как циркуляция скорости в несжимаемой жидкости возникает только от действия сил вязкости, то вычислить ее можно лишь на основе учета этих сил, т. е. на основе теории движения вязкой жидкости. Чаплыгиным и Жуковским в то время, когда эта теория еще не была достаточно развитой, был предложен для вычисления циркуляции скорости замечательный по своей простоте и вместе с тем достаточно близкий к действительности *постулат*, который гласит, что *выходящая угловая точка на хвостике профиля является точкой схода струй с профилем*. Этот постулат, как доказывается в теории крыла, позволяет однозначно вычислить величину циркуляции скорости и таким образом является способом косвенного учета сил вязкости, вызывающих циркуляцию скорости вокруг крыла.

Теорема Жуковского и постулат Чаплыгина — Жуковского представляют собою первое по времени решение проблемы подъемной силы, которое положило начало всей современной аэродинамике.

§ 48. Обобщения теоремы Жуковского о подъемной силе

Теорема Жуковского была здесь доказана лишь для случая, когда тело движется в среде с постоянной по величине и направлению скоростью и с неизменной во времени циркуляцией скорости по всякому охватывающему тело контуру. В общем случае движения тела в жидкости циркуляция скорости вокруг него будет изменяться с течением времени. Теорема Жуковского была обобщена на случай произвольного движения крыла в идеальной несжимаемой жидкости Л. И. Седовым¹⁾. Необходимо отметить, что если циркуляция скорости по всякому контуру, охватывающему тело, переменна во времени, то поток *не может быть везде потенциальным*: он должен содержать отдельные или непрерывно распределенные вихри. В самом деле, как известно из предыдущего, циркуляция скорости вокруг крыла возникает в начальный период его движения в связи с образованием и отрывом разгонного вихря. При этом, по теореме Томсона, циркуляция скорости вокруг крыла в каждый момент движения должна быть равна по абсолютной величине циркуляции скорости вокруг разгонного вихря. Следовательно, если крыло движется произвольным образом и циркуляция скорости вокруг него изменяется, то так же будет изменяться и циркуляция скорости вокруг разгонных вихрей. При всяком изменении циркуляции вокруг крыла с его

¹⁾ Седов Л. И., К теории неустановившихся движений внутри жидкости, Труды ЦАГИ, вып. 229, 1935, см. также Седов Л. И., Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики, Гостехиздат, 1950.