

ГЛАВА I ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Предмет аэродинамики. Краткий обзор истории развития аэродинамики

Аэрогидромеханикой называется наука о законах движения и равновесия жидкостей и газов и о силовом взаимодействии жидкой и газообразной среды с движущимся в ней телом или с ограничивающей ее поверхностью.

Законы движения жидкостей и газов оказываются во многом одинаковыми, и поэтому целесообразно объединить изучение механики жидкостей и механики газов. Но, кроме общих законов движения жидкостей и газов, существуют законы, свойственные только газу или только капельной жидкости.

Механика газа отличается от механики жидкости в тех случаях, когда газ движется с большой скоростью (близкой, или большей скорости распространения звука), когда газ разрежен (например, в атмосфере на большой высоте), когда он ионизирован (например, при высокой температуре) или когда пространство, занятое газом, имеет большую протяженность. Часть аэромеханики, занимающаяся изучением движения газа с большой скоростью, или газа, имеющего малую плотность, называется газовой динамикой. Механика ионизированного газа изучается магнитоаэродинамикой. Механика газа при большой протяженности занимаемого им пространства составляет предмет динамической метеорологии.

В настоящем курсе излагаются как законы движения, общие для жидкостей и газов, так и особые, присущие движению газа.

Кроме того, в настоящем курсе излагаются законы силового взаимодействия газообразной (в частности, воздушной) среды с движущимся в ней телом. Эта область аэрогидромеханики имеет основное значение для авиации и ракетостроения и своим современным развитием обязана главным образом этим отраслям техники. Мы будем называть эту область аэродинамикой.

Начало научной аэрогидромеханики было положено в XVIII столетии трудами академиков Российской Академии наук Леонарда Эйлера (1707—1783) и Даниила Бернулли (1700—1783). Эйлером были даны общие уравнения движения жидкостей и газов, указаны некоторые интегралы этих уравнений и сформулирован применительно к жидкому телу закон сохранения массы, установленный в общем

виде М. В. Ломоносовым. Эйлер исследовал также многие вопросы сопротивления жидкостей и применил результаты исследований к практическим задачам кораблестроения и конструирования гидравлических машин. Бернулли, который впервые ввел термин «гидродинамика», последовательно применил в своем труде, имеющем это название, закон сохранения живой силы и установил соотношение между давлением жидкости и ее кинетической энергией, известное в настоящее время под именем уравнения Бернулли; он исследовал также задачу о давлении струи жидкости на пластинку.

Исторически аэрогидромеханика как наука возникла на основе гидравлики, теории сопротивления судов и отчасти баллистики и представляла собой на первых порах обобщение фактических данных, добытых в этих, как тогда казалось, разнородных отраслях знания.

Однако долгое время, приблизительно, до конца XIX столетия, аэрогидромеханика развивалась крайне медленно. Причины этого заключались, с одной стороны, в том, что круг вопросов, которыми интересовалась практика, был тогда сравнительно узок. Гидравлика, корабельная наука, а на первых порах и воздухоплавание занимались главным образом *сопротивлением среды*. Изучалось, например, сопротивление, которое встречает жидкость при течении по трубам и каналам, сопротивление, испытываемое корпусом корабля, и т. д. Более сложные вопросы о *распределении* силового воздействия по поверхности тела, движущегося в жидкости или газе, тогда не ставились и возникли значительно позже в связи с необходимостью рассчитывать на прочность летательные аппараты. Таким образом, до появления авиации запросы практики мало стимулировали развитие научного исследования в области аэрогидромеханики.

С другой стороны, теория, развиваясь в некоторой мере в отрыве от практики, приводила иногда к результатам, противоречащим практике, и поэтому вызывала со стороны практиков известное недоверие к своим выводам. Следует упомянуть в этой связи, например, о так называемом парадоксе Эйлера—Даламбера; он заключается в том, что с точки зрения теории идеальной жидкости (т. е. жидкости, в которой отсутствуют силы трения) сопротивление тела, равномерно движущегося в жидкой среде, равно нулю, тогда как в действительности сопротивление, разумеется, существует.

Причина этого расхождения с действительностью состоит в том, что теория движения идеальной жидкости не учитывает малых по величине, но значительных по своему влиянию на характер движения сил трения. В настоящее время силы трения в жидкостях и их действие на поток детально изучаются аэрогидромеханикой. Однако во времена Эйлера и Даламбера теории движения вязкой жидкости, т. е. жидкости, в которой проявляются силы трения, не было, и конечный вывод об отсутствии сопротивления считался признаком слабости теории.

Слабость теории приводила к тому, что практика базировалась лишь на опытных данных. Однако эти данные, собираемые без направляющего воздействия теории, зачастую оказывались противоречащими друг другу, так как они зависели от многих обстоятельств, не учитываемых при постановке эксперимента. В качестве примера можно указать на так называемый парадокс Дюбуа. Дюбуа обнаружил на опыте, что сопротивление покоящегося тела, на которое набегаёт поток воды в канале, больше, нежели сопротивление тела, протаскиваемого с той же скоростью в спокойной воде. Ясно, что этот результат противоречит основному закону механики, согласно которому силы не зависят от того, какое из двух взаимодействующих тел покоится и какое находится в прямолинейном равномерном движении. Лишь впоследствии Н. Е. Жуковский, основатель современной аэродинамики, выяснил, что причиной этого парадокса является система вихрей, которая возникает при течении воды от стенок канала и не учитывается в опыте. Если поставить опыт так, чтобы этих вихрей не было, то исчезает и парадокс Дюбуа.

Лишь во второй половине XIX столетия, после открытия Рейнольдсом условий перехода ламинарного движения в турбулентное и создания теории подобия, многие исследователи в области гидромеханики поняли, что без теории, ставящей задачи эксперименту и обобщающей его результаты, не может быть и научно поставленного эксперимента.

Мощный толчок развитию аэрогидромеханики был дан в начале XX столетия возникновением новой отрасли техники — авиации, которая выдвинула перед наукой ряд новых проблем и по-иному поставила многие прежние.

Одной из новых проблем, выдвинутых авиацией перед аэрогидромеханикой, была *проблема подъемной силы*. Без подъемной силы, уравнивающей вес летательного аппарата, невозможен горизонтальный полет на аппарате тяжелее воздуха. Поэтому исследование возникновения подъемной силы является одним из важнейших для авиации.

Еще задолго до первых полетов аппаратов тяжелее воздуха выдающиеся умы человечества стремились разрешить загадку полета птиц. Первым известным в настоящее время исследователем проблемы подъемной силы был знаменитый итальянский художник и ученый Леонардо да Винчи. Он предполагал (его заметки по этому вопросу относятся приблизительно к 1505 г.), что причиной силы, поддерживающей птицу в воздухе, являются быстрые удары ее крыльев, под действием которых воздух под крыльями уплотняется. Однако, как теперь установлено, сжимаемость воздуха, в которой Леонардо да Винчи видел причину подъемной силы, на самом деле может заметно влиять на силы, возникающие при движении в воздухе, лишь при больших скоростях полета, порядка скорости распространения звука.

Долгое время, вплоть до текущего столетия, в науке господствовала другая теория, основанная на представлениях Ньютона

(1642—1727), о том, что воздух состоит из отдельных, не связанных между собою частиц, которые, двигаясь в потоке, набегающем на препятствие, ударяются о его переднюю сторону и отдают препятствию свое количество движения. При этом предполагается, что частицы, которые не сталкиваются с препятствием, следуют мимо него по прямолинейным траекториям (рис. 1.1). Частицы, находящиеся за препятствием, считаются неподвижными, а область за препятствием (она называется застойной областью) предполагается простирающейся до

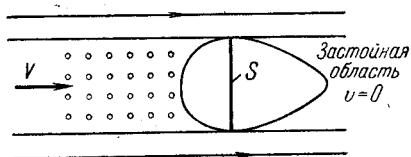


Рис. 1.1. Схема обтекания препятствия по ударной теории Ньютона.

противления пропорциональна плотности среды, квадрату скорости и квадрату линейных размеров тела (площади S). Однако численная величина лобового сопротивления получается по этой теории неправильной, так как не учитывается влияние формы тела на его лобовое сопротивление. Происходит все это потому, что исходная модель явления и схема обтекания, изображенная на рис. 1.1, вообще говоря, не соответствуют действительности и являются чрезмерно упрощенными. Лишь при движении в сильно разреженном газе (например, в атмосфере на большой высоте) или при движении в газе с очень большой скоростью (значительно большей скорости звука)

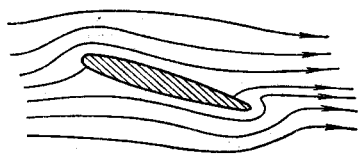


Рис. 1.2. Схема обтекания препятствия по теории непрерывной среды Эйлера.

можно рассматривать среду как состоящую из отдельных молекул, ударяющихся о препятствие. Тогда ударная теория сопротивления среды становится справедливой, и в этом состоит ее огромное современное значение.

Со времени Эйлера стала развиваться и становилась все более достоверной иная точка зрения на жидкую или газообразную среду, противоположная ньютоновской. Согласно точке зрения Эйлера, жидкость или газ следует рассматривать как непрерывную, легко деформируемую материю. Струйки, подходя к препятствию, не ударяются в него как отдельные (дискретные) частицы по ударной теории, а отклоняются от препятствия у его передней стороны, плавно со всех сторон его обходят (обтекают) и смыкаются на задней стороне (рис. 1.2). Эта точка зрения ближе к действительности (при не очень больших скоростях полета), нежели ударная теория, но так как в жидкости во времена Эйлера не учитывали сил трения, то гипотеза

бесконечности. Эта теория получила название корпускулярной или ударной теории сопротивления среды. Если принять схему явления согласно этой теории, то можно подсчитать как лобовое сопротивление, так и подъемную силу.

Справедливым в этой теории, с современной точки зрения, является то, что сила лобового со-

противления

противления

о непрерывной среде приводила, как уже указывалось, к парадоксальному результату об отсутствии силы сопротивления.

Одно время казалось, что выход из создавшегося положения намечается работами Гельмгольца и Кирхгофа, относящимися к 1868 и 1869 гг. Гельмголец обратил внимание на то, что в жидкости возможно движение струй, не смешивающихся с окружающей средой на значительном протяжении. В непрерывной среде могут быть, по мысли Гельмгольца, две области течения, разделенные поверхностью разрыва скоростей (в данном случае — границы струи, движущейся в спокойной жидкости). Здесь мы видим своеобразное соединение двух противоположных точек зрения, одна из которых основана на представлении о прерывном, а другая — о непрерывном строении потока жидкости или газа. В этой новой точке зрения содержатся в преобразованном виде элементы каждой из двух предыдущих.

Идеи Гельмгольца были применены Кирхгофом к вычислению силы давления потока на тело. Представим себе, например, плоскую пластинку, поставленную под некоторым углом к набегающему на нее потоку. Струйки, приближаясь к пластинке, отклоняются от своего первоначального направления, вблизи пластинки расходятся по направлению к ее краям и плавно обтекают ее переднюю сторону.

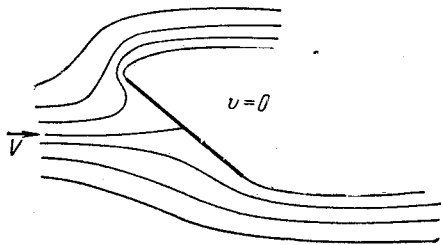


Рис. 1.3. Схема обтекания пластинки по струйной теории Гельмгольца-Кирхгофа.

Однако за пластинкой движение предполагается в этой теории разрывным. Струйки срываются с кромок пластинки и текут дальше, постепенно приближаясь к своему первоначальному направлению перед пластинкой (рис. 1.3). Эти струйки являются линиями разрыва скорости. Они отделяют застойную область за пластинкой, где, с точки зрения и Ньютона, и Кирхгофа, скорость равна нулю, от внешней области, в которой жидкость движется во всех точках.

Давление в застойной области за пластинкой везде постоянно, и если пластинка находится в потоке атмосферного воздуха, то давление в этой области равно атмосферному. Перед пластинкой давление повышено по сравнению с атмосферным; разность давлений, приложенных к передней и задней сторонам пластинки, будучи просуммирована по всей ее поверхности, приводится к силе, направленной перпендикулярно к плоскости пластинки. Разлагая эту силу на составляющие вдоль набегающего потока и перпендикулярную к нему, получаем лобовое сопротивление и подъемную силу.

Будучи математически весьма изящно оформленной, используя аппарат теории функций комплексного переменного, струйная теория Кирхгофа, — или, как правильное ее называть, теория Кирхгофа —

Жуковского, так как Жуковским в 1890 г. она была значительно видоизменена и приспособлена к решению практических задач, — привлекала внимание многих исследователей. Однако, являясь шагом вперед в определении сопротивления неудобообтекаемых тел, она оказалась малопригодной для удобообтекаемых тел (т. е. тел малого сопротивления), имеющих основное значение для авиационной техники.

Если тело неудобообтекаемо, например, если пластинка поставлена перпендикулярно к потоку, то представление о застойной зоне за телом в известной мере соответствует действительности. Так, например, пассажир, находящийся за ветровым стеклом автомобиля, не ощущает ветра. Но если тело удобообтекаемо, то срыва струй не получается, — его поверхность охватывается струйками плавно на всем своем протяжении.

Давление на задней стороне поверхности удобообтекаемого тела не равно поэтому атмосферному давлению, как это было бы в случае образования застойной области за телом. Опыты показывают, что в действительности это давление может быть значительно меньше атмосферного. Подъемная сила крыла является не только результатом повышения давления на передней стороне поверхности, но также результатом понижения давления на задней стороне. Поэтому струйная теория дает величины подъемной силы, значительно уменьшенные против действительных, не говоря уже о том, что для удобообтекаемых тел вся картина явления получается по струйной теории совершенно не соответствующей действительности.

Таково было положение проблемы подъемной силы к началу XX столетия. Практика к этому времени значительно опередила теорию. Одним из пионеров авиации, О. Лилиенталем, еще в 1874 г. было опытным путем установлено, что подъемная сила несущей поверхности увеличивается, если сделать ее слегка искривленной, обращенной выпуклостью в ту же сторону, что и направление действия подъемной силы. Но с точки зрения струйной теории влияние кривизны задней поверхности и толщины крыла на его подъемную силу не поддавалось ни объяснению, ни расчету. Конструкторы первых самолетов поэтому не находили в струйной теории сколько-нибудь надежных указаний, каким должно быть крыло самолета для того, чтобы он мог подняться в воздух и поддерживать себя в полете.

Решение проблемы подъемной силы было впервые дано Н. Е. Жуковским (1847—1921), чем и было положено начало современной аэродинамике. Один из учеников Н. Е. Жуковского, Л. С. Лейбензон, указывает¹⁾, что к идее решения задачи о подъемной силе Жуковский пришел еще осенью 1904 г., но лишь через год сделал доклад о своей работе в Московском математическом обществе, а опубликовал

¹⁾ Лейбензон Л. С., Николай Егорович Жуковский (к столетию со дня рождения), Изд-во АН СССР, 1947.

ее в 1906—1907 гг.¹⁾ Н. Е. Жуковский рассматривает непрерывное обтекание (без срыва струй с поверхности) профиля крыла и исследует влияние профиля на окружающую среду. Оказывается, что при наличии подъемной силы, из потока, вызванного влиянием крыла, можно выделить *поток с замкнутыми струйками*, окружающими профиль; этот поток Жуковский называет *циркуляционным* и устанавливает, что в нем заключается причина возникновения подъемной силы.

Вычисляя подъемную силу, Н. Е. Жуковский выводит свою знаменитую теорему, являющуюся и до настоящего времени основой теории крыла, — теорему о том, что *подъемная сила, приходящаяся на единицу длины размаха крыла, равна произведению плотности среды на скорость набегающего потока и на величину, характеризующую циркуляционный поток, называемую циркуляцией скорости*.

Эта последняя величина определяется в конечном счете силами трения в потоке, и таким образом, Жуковский впервые построил теорию подъемной силы на учете тех действительных причин, которые эту силу определяют. Но оставался открытым вопрос о величине циркуляции скорости.

Вычислить ее средствами теории вязкой жидкости тогда было весьма затруднительно, да и до настоящего времени это является еще нерешенной проблемой. Н. Е. Жуковскому удалось решить этот вопрос в наиболее важном для практики случае, именно в случае малых углов атаки и заостренного хвостика профиля. В начале 1910 г. на XII съезде русских естествоиспытателей и врачей в результате обмена мнениями между Н. Е. Жуковским и его учеником С. А. Чаплыгиным был установлен новый *постулат* о том, что *точкой схода струй с контура профиля должна быть* в случае заостренного хвостика крайняя, *хвостовая точка профиля*. Этот постулат, который называется постулатом (или гипотезой) Чаплыгина — Жуковского, позволил до конца вычислить величину подъемной силы и выяснить влияние на нее толщины, кривизны и других характерных параметров профиля крыла. Таким образом, трудами русских ученых, и в первую очередь трудами Н. Е. Жуковского, было положено начало новой науке — аэродинамике.

Впоследствии (1913) С. А. Чаплыгиным были созданы основы теории крыла конечного размаха, позволившей выяснить влияние удлинения крыла на его подъемную силу и лобовое сопротивление.

Н. Е. Жуковский не только решил проблему подъемной силы крыла; им впервые была создана стройная и логически последовательная вихревая теория крыла и гребного винта, разработаны методы и оборудование для экспериментального исследования в аэродинамике,

¹⁾ Жуковский Н. Е., О присоединенных вихрях, Труды отделения физических наук Общества любителей естествознания, т. XIII, вып. 2, 1906.

созданы основы аэродинамического расчета и динамики самолета. Ученик Н. Е. Жуковского С. А. Чаплыгин (1869—1942) еще в 1902 г., задолго до появления скоростных самолетов, дал теорию движения газа с большими скоростями и является поэтому основоположником современной газовой динамики. Под руководством Н. Е. Жуковского были построены первые в России аэродинамические лаборатории (в Московском государственном университете, в Московском высшем техническом училище и в Кучине, под Москвой). По инициативе Н. Е. Жуковского был организован 1 декабря 1918 г. Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), в котором он был до своей смерти председателем коллегии и который носит ныне его имя.

Огромные заслуги Н. Е. Жуковского в деле развития отечественной авиации были отмечены В. И. Лениным; он назвал Жуковского «отцом русской авиации». Исследования Н. Е. Жуковского и его многочисленных учеников выдвинули русскую и советскую авиационную науку на первое место в мире.

В связи с быстрым возрастанием скоростей полета перед аэродинамикой наряду с проблемой подъемной силы возникла и стала приобретать все большее значение другая, новая *задача об определении нагрузок*, распределенных по поверхности летательного аппарата. Ясно, что эта задача является более общей, нежели задача об определении суммарного силового воздействия. Последняя задача всегда может быть решена, если известно решение первой; но, зная суммарное силовое воздействие, невозможно найти распределение нагрузок.

Для того чтобы найти распределение аэродинамических нагрузок по поверхности тела, необходимо более глубоко изучить движение жидкости, нежели для того, чтобы определить суммарное силовое воздействие. Для этого необходимо определить движение жидкости *в каждой точке* занимаемого ею пространства. Современная аэродинамика так именно и ставит вопрос: *задача только тогда считается решенной, когда скорости, действующие силы и другие характеристики движения определены в каждой точке и для каждого момента времени.*

Такой постановкой вопроса современная аэродинамика отличается от прежней гидравлики, корабельной науки и баллистики, которые занимались главным образом определением общих, суммарных характеристик движения (расхода жидкости, общего сопротивления и т. д.).

Основоположник современной аэродинамики Н. Е. Жуковский никогда не отделял теорию от практики. Глубина теоретического анализа всегда сочеталась у него с доведением результатов исследования до конкретных практических выводов. Для Жуковского характерно то, что он всегда чутко прислушивался к запросам практики; при построении самых сложных и, казалось бы, отвлеченных теорий

он исходил из данных наблюдения и опыта и неизменно проверял выводы теории на практике.

Стремление к творческому взаимодействию теории и практики характерно для всей советской школы аэродинамики, как и вообще для всей современной подлинной науки, стоящей на позициях *диалектического метода познания действительности*:

«От живого созерцания к абстрактному мышлению и *от него к практике* — таков диалектический путь познания *истины*, познания объективной реальности» (В. И. Ленин)¹).

Развившись на опытном и теоретическом материале других наук (гидравлики, баллистики и т. д.), многое позаимствовав из них, аэродинамика, под давлением все более усложняющихся практических запросов авиации, достигла за короткий срок (приблизительно пятьдесят лет) высокой степени развития и стала в свою очередь обогащать своими результатами другие отрасли науки и техники.

Так, например, аэродинамика крыла представляет собой основу расчета и конструирования современных быстроходных пропеллерных турбин и насосов. Газовая динамика получила теперь широкое применение не только в расчетах и конструировании скоростных самолетов и воздушных винтов, но также при проектировании паровых и газовых турбин, реактивных двигателей и ракет, в теории движения артиллерийских снарядов и т. д.

В настоящее время аэрогидромеханика является основой для расчета летательных аппаратов, гидравлических и газовых турбин, насосов, компрессоров и вентиляторов, гребных винтов, вентиляционных установок и гидротехнических сооружений. На ней базируется теория сопротивления движению судов, теория смазки, динамическая метеорология, теория движения грунтовых вод и, в значительной мере, теория пластического деформирования металлов и теория теплопередачи. Короче говоря, во всех вопросах, где необходимо исследовать движение жидкости или газа, с успехом применяются законы аэрогидромеханики.

§ 2. Применение аэродинамики в авиационной и ракетной технике

В этом курсе рассматриваются применения аэродинамики главным образом к вопросам авиации. Поэтому следует сразу же конкретизировать, применительно к этим вопросам, общее определение аэродинамики, которое было дано в начале.

В аэродинамике летательного аппарата приходится рассматривать движение твердого или упругого тела в жидкой или газообразной среде. *Аэродинамика летательного аппарата является наукой о механическом взаимодействии между средой и движущимся*

¹) Ленин В. И., Философские тетради, стр. 166, 1938.