

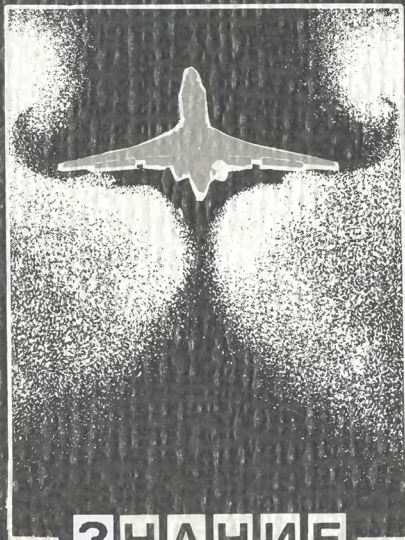
ЖЗМ

ЖИЗНЬ
ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫХ
ИДЕЙ

Герман Смирнов

РОЖДЕННЫЕ ВИХРЕМ

С незапамятных времен
люди сталкивались с могуществом
гидроаэродинамических сил,
но лишь сравнительно недавно ученым
стало ясно, что порождает
их вихрь...



ЗНАНИЕ

**ЖИЗНЬ
ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫХ
ИДЕЙ**



Герман Смирнов

РОЖДЕННЫЕ ВИХРЕМ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
„ЗНАНИЕ”
МОСКВА 1982

ББК 22.253.3
С 50

Рецензенты: Н. М. Синев, доктор технических наук, профессор, Г. Н. Алексеев, кандидат технических наук.

С 50 **Смирнов Г. В.**
Рожденные вихрем. — М.: Знание, 1982. —
192 с., ил. — (Жизнь замечательных идей).
70 коп.

«Рожденные вихрем» — это гидроаэродинамические силы, действующие на тела со стороны обтекающих их потоков жидкостей и газов. Сфера действия этих сил поистине безгранична. Сюда входят движения атмосферы и океана, течения в трубах и каналах, полет снарядов и самолетов, плавание кораблей и рыб, парение планеров и птиц. В доступной форме, увлекательно автор рассказывает об истории становления и развития основных понятий и законов современной гидроаэродинамики.

Научно-художественная книга рассчитана на широкий круг читателей.

С 1703040000—027 22—82 1703040000 ББК 22.253.3
073(02)—82 533

Введение ЧТО ИЗОБРЕЛ РОБЕРТ ФУЛТОН?

В

1931 году во время переезда редакции английского журнала «Инженер» в новое помещение при разборе архива была обнаружена пачка из двадцати раскрашенных акварелью чертежей. То были невесть как попавшие сюда чертежи Роберта Фултона (1765—1815) к заявке на изобретение парохода, направленной некогда в патентное бюро США. Эту находку — а она была уникальной, поскольку первый комплект таких чертежей вместе с заявкой погиб при пожаре патентного бюро в 1836 году, — редакция приподнесла в дар Американскому Обществу инженеров-механиков, где она произвела настоящий фурор. Особый интерес вызвал чертеж № 2, с неожиданной стороны показавший те трудности, с которыми раньше всех столкнулся изобретатель парохода Роберт Фултон...

Во времена парусного флота главной заботой кораблестроителей были мореходные качества — плавучесть, остойчивость, непотопляемость, ходкость, живучесть, плавность качки. Что же касается дальности плавания, то она, будучи практически неограниченной для всех парусников, никак не была связана со скоростью хода. Поэтому кораблестроители не интересовались сопротивлением, которое оказывает вода движущемуся в ней корпусу, и при выборе площади парусов руководствовались не достижением заданной скорости хода, а способностью судна безопасно нести парусное вооружение.

Появление паровой машины на судне должно было положить конец такой практике проектирования. У парохода, в отличие от парусника, дальность плавания не безгранична, а зависит от принятого на борт запаса топлива, которое расходуется тем быстрее, чем мощнее паровая машина. А для определения ее мощности необходимо знать сопротивление, которое испытывает корпус

при заданной скорости хода. Таким образом, сама установка машины на судне автоматически выдвинула на первый план проблему вычисления гидродинамического сопротивления. И чертеж № 2 в чудом обретенном комплекте фултоновских документов свидетельствовал о том, что американец был первым, кто практически столкнулся с этой трудностью, и что оценка сопротивления корпуса парохода была ключевым моментом в его изобретении.

И до Фултона не было недостатка в изобретателях, пытавшихся установить паровую машину на корабль. Но, будучи не в силах гармонично увязать между собой корпус, двигатель и движитель—гребные колеса, весла или винт, они терпели одну за другой неудачи, которые, как писал Фултон, «произвели на общественное мнение Европы и Америки впечатление, будто бы практически было невозможно создать пригодное паровое судно».

Поставив своей целью создать конкурентоспособный транспорт с гарантированной скоростью хода, Фултон должен был любым путем — расчетом, экспериментом, чутьем — достаточно верно оценить сопротивление корпуса еще не существующего судна. Чертеж № 2 пролил неожиданный свет на эти усилия Фултона: инженеры и историки техники с изумлением обнаружили схему и сводку экспериментальных данных по сопротивлению досок и тел разной формы и длины, полученных английским исследователем М. Бофуа в 1793—1798 годах.

Хотя метод, с помощью которого Фултон на основе этих цифр вычислил сопротивление своего «Клермонта» — первого построенного им парохода, утрачен навсегда, нет никакого сомнения, что сам он высоко ценил произведенные им расчеты, видя в них существенную часть своего изобретения. Об этом свидетельствует четвертый пункт выданного ему в 1809 году патента. «Да будет известно всем, кого это может касаться, что я заявляю свое исключительное право на данное изобретение, основываясь не только на самой идее установки машины на судне, но также на разработке необходимой для этого формы корпуса, размеров лопастей и скорости, с которой они должны двигаться, приведенной в соответствие с формой носа и кормы, осадкой судна, его скоростью, трением и общим сопротивлением; *а также на вычислении мощности паровой машины для сообщения всему судну необходимой скорости*» (курсив мой. — Г. С.).

С этого момента вычисление гидродинамического со-

противления, испытываемого движущимся кораблем, стало технической потребностью, которая дает развитию науки более сильный толчок, чем десяток научных трактатов.

Поначалу такое утверждение может вызвать удивление: ведь Фултон был далеко не первым, кто интересовался гидродинамическим сопротивлением, и до него десятки исследователей ломали голову над разгадкой этого сложного явления. Но именно Фултон сделал изобретение, которого настоятельно требовало промышленное развитие Европы и которое потребовало умения точно вычислять силу сопротивления будущего еще не существующего судна. А так до Фултона вопрос о гидродинамическом сопротивлении не ставил никто!

В самом деле, в разное время вопрос о взаимодействии тел со средой ставился по-разному, поэтому и в решениях освещались разные стороны явления. Так, знаменитый древнегреческий философ Аристотель, вознамерившись создать стройную систему мироздания, всюду искал причины и следствия. Рассуждая чисто умозрительно, он пришел к выводу, будто вода или воздух одновременно и тормозят движение, и поддерживают его. Следовательно, без сопротивляющейся среды движение невозможно, а потому невозможен вакуум, пустота.

Через полтора тысячелетия схоласты средневековья показали, что словесные объяснения механизма движения, набросанные Аристотелем, не выдерживают проверки логикой, но дальше этого негативного результата они не пошли. Честь создания теоретической механики, полученной простым «очищением» движения тел от затемняющих его эффектов гидроаэродинамического сопротивления, выпало на долю великих механиков и астрономов XVII века — Кеплера, Галилея, Гюйгенса, Ньютона и других.

Но изящные построения и формулы теоретической механики и астрономии, которые рассматривали движение в пустоте, не оказывающей никакого сопротивления, не представляли особой ценности для практики, для земных условий, где невозможно пренебречь сопротивлением окружающей среды. Поэтому, не ограничиваясь только идеальными случаями, в XVII веке и естествоиспытатели, и люди практики начинают уделять больше внимания силам гидроаэродинамического сопротивления. Но как ставят они при этом вопрос?

Астрономов интересует порядок этих сил, от чего и как они зависят и могут ли влиять на траектории движения небесных тел. Иначе смотрят на дело артиллеристы, которых мало волновала сама по себе величина силы сопротивления воздуха летящему ядру. Заботясь только о надежном поражении цели, они готовы были довольствоваться поправками на сопротивление воздуха, с помощью которых можно было бы скорректировать теоретические траектории и приблизить их к требованиям реального боя. Судостроители тех лет тоже мало изучали собственно величину сопротивления корпуса. Их больше занимал вопрос, как найти форму корпуса, которая при данном парусном вооружении гарантировала бы наибольшую скорость. А купцы, перевозившие грузы по рекам и каналам, мечтали о наивыгоднейшей форме, которая позволила бы им сэкономить на числе буксирующих баржи лошадей и на корме для них.

Понадобилось сто лет промышленного развития Европы, изобретение паровой машины, прежде чем Фултон смог поставить вопрос по-новому: как определить величину сопротивления будущего судна, без которой нельзя вычислить мощность машины, потребную для достижения заданной скорости. Задача эта оказалась невероятно трудной, и надежно определять сопротивление корабля инженеры научились лишь шестьдесят лет спустя. И понадобилось еще шестьдесят лет, понадобились усилия выдающихся математиков, экспериментаторов и инженеров, понадобилась современная гидроаэромеханика, чтобы к началу XX века научиться точно вычислять те две силы, без которых немыслимы многие сооружения современной техники, — подъемную силу и силу лобового сопротивления, действующие на любое тело, обтекаемое жидкостью или газом.

Глава I. ФИЗИКА СКВОЗЬ ПРИЗМУ МЕТАФИЗИКИ

В

1215 году на Латеранском соборе папа Иннокентий III официально запретил распространять учение греческого философа Аристотеля, которое породило и впредь могло порождать неведомые лжеучения. А 39 лет спустя — в 1254 году — Парижский университет приступил к изданию полного собрания сочинений этого выдающегося мыслителя...

Что же произошло за эти четыре десятилетия? Что побудило римско-католическую церковь пересмотреть свое отношение к великому греку?

Мы не ошибемся, сказав, что эта знаменательная перемена была одним из многочисленных следствий раннепротестантских учений, возникших в Западной Европе в XII веке.

Ватикан моментально оценил опасность этих еретических учений, и среди других средств борьбы с ними в арсенале католической церкви появилась схоластика. «Вера ищет разумения, — говорили приверженцы этого течения. — Надо призвать разум в помощь церковному авторитету, надо превратить разум из врага в служителя авторитета». Схоласты поставили целью дать систематическое изложение всего христианского вероучения, так чтобы в полном тексте ни одно утверждение не противоречило другому. Позже над заумными диспутами схоластов много смеялись, и не всегда оценивали по достоинству ту колоссальную работу по изучению текстов священного писания, которая подготовила великое реформационное движение XVI века. Оценивая ее, Ф. Энгельс писал: «На средние века смотрели как на простой перерыв в ходе истории, причиненный тысячелетним всеобщим варварством... никто не обращал внимания на величие шагов вперед, сделанных в течение средних веков». Эта мысль убедительно подтверждается и той

стороной деятельности схоластов, которая стала особенно важной для развития науки.

Ведь именно им потребовалась строгая логика и изощренные приемы спора. А то и другое можно было найти в трактатах древних философов. Поэтому во второй половине XIII века христианское богословие устремляется к источникам древней науки, и прежде всего к Аристотелю. Его труды изучаются с такой страстностью, что два века спустя никто уже не мог претендовать на получение ученой степени без основательного знакомства с его творениями. Так, волею судеб аристотелевские рассуждения полуторатысячелетней давности были вынесены на самую стремнину западноевропейской умственной жизни, и в центре внимания тогдашнего ученого мира наряду с множеством других проблем оказались и рассуждения Аристотеля о движении твердых тел в сопротивляющейся среде...

Динамика, трактуемая философски

Основные представления Аристотеля о движении тел содержатся в трактате «Физика». Наблюдая окружающий мир, философ пришел к выводу, что все природные тела можно разделить на две группы — легкие (огонь и воздух) и тяжелые (вода и земля). Предоставленные сами себе, они устремляются к своим естественным местам: легкие поднимаются вверх, тяжелые падают вниз. Такие простейшие вертикальные движения Аристотель называл естественными. И самым важным из них он считал свободное падение...

Далее великий философ делает два важных заключения. Во-первых, чем тяжелее тело и чем меньше площадь его поперечного сечения, тем быстрее оно проходит в падении данное расстояние. И во-вторых, чем плотнее, чем гуще среда, в которой движется падающее тело, тем труднее она расступается перед ним, тем больше сопротивляется его движению и тем сильнее замедляет его.

Сформулированная на чисто качественном уровне, эта зависимость, конечно, не выдерживала мало-мальски серьезной опытной проверки. Но наблюдение, согласно которому скорость падения тела прямо пропорциональна его весу и обратно пропорциональна плотности окружающей среды, выглядело столь очевидным и убедительным, что Аристотелю удалось построить на нем кажущееся не-



Рис. 1. Греческий философ Аристотель (384—322 гг. до н. э), создавший одну из первых гипотез сопротивления жидкостей.

опровержимым доказательство невозможности существования вакуума.

В самом деле, рассуждал он, скорости двух одинаковых тел, падающих, скажем, в воздухе и в воде, должны находиться в отношении, обратном плотностям воздуха и воды. А если предположить теперь, что одно из них движется в пустоте?

При таком предположении никакого пропорционального отношения между нулем и каким-либо числом не получается. Тело в вакууме должно двигаться бесконечно быстро — проходить путь «в никакое время»! А поскольку такое движение невозможно, Аристотель вполне логично приходил к выводу о бессмысленности понятия пустого пространства.

Сейчас, когда существование вакуума не может вызывать ни малейших сомнений, мы знаем, что Аристотель ошибался. И тем не менее едва ли можно винить великого философа за его заблуждение. Можно даже сказать больше: не допусти Аристотель ошибочного толкования свободного падения — и он не смог бы дать вообще никакого объяснения горизонтальному полету тел...

Действительно, Аристотель видел, что нельзя заставить какое-нибудь тело двигаться, не приложив к нему силы. В естественных движениях — в падении — такой

силой является вес. А что заставляет двигаться брошенный камень, когда, выскользнув из руки, он оказывается предоставленным самому себе? На него должна действовать движущая сила, считал Аристотель. Но какая? Откуда она берется? Как возникает?

В поисках этой обязательной силы философ придумал малоубедительное объяснение: брошенное тело будто бы освобождает за собой пространство, в которое устремляется окружающий воздух. Поскольку этот воздух стремится в «свое естественное место» быстрее, чем тело в свое, он непрерывно подталкивает тело вперед. Ясно, что без воздуха, в пустоте горизонтальное движение вообще невозможно было объяснить.

Раздел о насильственном горизонтальном движении оказался самым слабым местом в динамике Аристотеля, ибо среда, как он считал, с одной стороны, необходима для того чтобы толкать тело вперед, а с другой — она препятствует движению, тормозит его. Впоследствии именно из-за противоречивости этих положений работы Аристотеля по динамике часто подвергались осмеянию. Но не следует забывать, что в этом сложнейшем разделе механики у Аристотеля не было предшественников. Что, не допуская существования вакуума, он обрек себя на исследование самых трудных в механике движений твердых тел в сопротивляющейся среде. Что именно Аристотель первым взялся за обсуждение проблем, к которым спустя столетие не решился подступить даже сам создатель статики Архимед. Потом нередко говорили, что механика древности состояла из статики, трактуемой чисто математически, и динамики, трактуемой чисто философски. И в этом философском характере аристотелевой динамики, в том, что никто не руководствовался ею в практической деятельности, лежит, пожалуй, секрет ее поразительного долголетия.

Учение великого грека о движении тел две тысячи лет успешно противостояло нападкам оппонентов-философов и рухнуло в XVII веке под напором сравнительно малочисленных ученых, призванных к деятельности нарождающимся европейским капитализмом с его арсеналами, мельницами, мануфактурами и каналами. Но уже в предшествовавшие столетия аристотелевскую динамику подточили и ослабили люди, которые искренне считали Аристотеля своим духовным учителем, достигшим высших возможных степеней во всех науках...

После смерти Александра Македонского в 323 году до нашей эры Аристотель, лишившийся поддержки своего царственного ученика, был вынужден бежать в Халкиду, где и умер через год. С этого момента Афины, уже утратившие политическое влияние, стали мало-помалу терять первенство и в духовной жизни греческого мира. Там оставались еще философские школы, но центр научных интересов начал перемещаться в основанную Александром Македонским Александрию Египетскую. Именно здесь по приказу царя Птолемея I Сотера ученик Аристотеля Деметрий Фалерский создал по образцу аристотелевского Ликей знаменитый Александрийский Мусейон.

В отличие от мудрецов афинских школ александрийские ученые поначалу отказались от общих философских рассуждений и приступили к систематическому научному исследованию конкретных явлений природы. Но потом, по словам английского историка науки У. Уевеля, «изобретательность, утомленная и восхищенная приобретениями, которые она сделала», начинает падать. Наблюдения вытесняются собиранием текстов, анализом и объяснением трудов и мнений прежних авторов. Прошло пятьсот лет после основания Александрийского Мусейона, и в нем уже торжествовал дух комментаторства и подражания. Комментаторов, которые прежде старались не только объяснять, но и исправлять, дополнять изучаемые тексты, сменили рабские толкователи, принимающие на веру самые неправдоподобные утверждения почитаемых учителей. Именно в этот период в Александрии начал складываться культ Аристотеля, как человека, который «довел науки до высшей возможной степени, измерил весь их объем и определил их окончательные и неизменные границы».

В начале VI века александриец Иоанн Грамматик, прозванный Филопоном-трудолюбцем, задавшись целью очистить учение Аристотеля от наслоения комментаторских измышлений, написал еще один обширный комментарий, вполне заурядный, если не считать одного расхождения во мнениях. Филопон первым в истории оспорил аристотелевское объяснение насильственного горизонтального движения, согласно которому брошенное тело подталкивается вперед толчками воздуха, устремляющегося в пустое пространство за телом. Правда, Филопон не ставит экспериментов, не поверяет Аристотеля опы-

том. Он лишь задает вопросы, на которые не может найти ответов в трудах великого философа.

— Почему, — вопрошал Филопон, — приведенное в движение колесо продолжает вращаться вокруг своей оси? Где же здесь та задняя грань, на которую может давить толкающий колесо воздух? Почему камень можно бросить дальше, чем перо?

По всей видимости, утверждал Филопон, дело обстоит не так, как оно представляется Аристотелю. Толчок сообщает телу некую способность к движению, которая, после того как действие окончилось, начинает расходоваться по мере перемещения тела в пространстве. И когда запас этой способности иссякнет, тело останавливается. К сожалению, ценная идея Филопона, в которой смутно предугадан и закон инерции движения, и понятие о кинетической энергии движущегося тела, оказалась забытой на целых восемь столетий — вплоть до середины XIV века, когда она возродилась в трудах некоторых схоластов...

Крупнейшим из них был англичанин У. Оккам (ок. 1285—1349). Это ему принадлежит принцип «бритвы Оккама»: «Напрасно пытаться сделать посредством большего то, что может быть сделано посредством меньшего».

Оккам не занимался специально проблемами движения. Он просто добавил к вопросам сомневающегося Филопона еще один, также не делая никакой попытки ответить на него: если летящую стрелу сзади толкает воздух, то как же могут две стрелы пролетать совсем рядом друг с другом в противоположных направлениях?

Более подробно проблемы движения изучал ученик Оккама Жан Буридан (ок. 1300—ок. 1358), ректор Парижского университета, имя которого навсегда оказалось связанным с выражением «Буриданов осел».

В обсуждении проблемы движения Буридан идет дальше Оккама. Прежде всего, он добавляет еще несколько вопросов, на которые нельзя ответить, приняв аристотелевское объяснение насильственного движения. Почему даже при одинаковой начальной скорости камень движется в воздухе иначе, чем перо? Если толчки воздуха на заднюю стенку стрелы движут ее вперед, то почему заострение тупого конца стрелы, уменьшающее поверхность, а следовательно и саму толкающую силу, не уменьшает скорости ее полета?

Так же как и Филопон, Буридан предполагает, что

толчок сообщает телу некий запас движения — импетус — пропорциональный начальной скорости и количеству материи. И подобно Филопону, он объясняет прекращение движения тем, что сопротивление воздуха и вес, заставляющий тело двигаться не туда, куда направляет его импетус, непрерывно уменьшают величину импетуса, истощение которого приводит в конце концов к остановке тела без каких-либо видимых внешних причин. Однако попытка Буридана приложить теорию импетуса к объяснению свободного падения привела его к довольно-таки неуклюжей и натянутой теории. В начальный момент, утверждал Буридан, тело движется под действием одной только тяжести, поэтому скорость его мала. По мере же того как тяжесть сообщает телу импетус, оно под действием и тяжести, и импетуса начинает двигаться быстрее. Но чем быстрее оно движется, тем больше и больше становится его импетус, и в результате скорость падающего тела непрерывно возрастает.

Парижские ученики Буридана Николай Орезм и Альберт Саксонский не только способствовали распространению теории импетуса в Европе, но и внесли свой вклад в учение о движении тел. Так, математик, физик и экономист Николай Орезм (ок. 1328—1388) за двести лет до Декарта стал графически рассматривать движение тела в системе прямоугольных координат. Исследовав с чисто геометрической точки зрения равномерные, равномерно ускоренные и неравномерно ускоренные движения, он способствовал выработке таких важных понятий, как ускорение и средняя скорость равномерно переменного движения, и установил закон, связывающий путь и время в равномерно ускоренном движении.

Рассуждения Альберта Саксонского (преподавал в Сорбонне в 1350—1361 годах) отличались большей физической глубиной. Предположив, что действие земного тяготения на падающее тело одинаково на всех высотах, он детально рассмотрел два случая: в одном скорость падения принималась прямо пропорциональной пройденному пути, в другом — времени падения. В итоге Альберт отвергает обе гипотезы, как приводящие к нелепому с его точки зрения результату — бесконечной скорости. Не подозревая о том, что нелепость вывода заложена в рассуждение неправильной посылкой — сила тяжести зависит от высоты, поэтому даже в вакууме скорость падения тела на планету конечна, — Альберт Сак-

сонский выдвинул другую гипотезу: сопротивление движению падающего тела растет быстрее, чем импульс, поэтому вскоре после начала падения устанавливается конечная и постоянная скорость.

Таким образом, вклад схоластов в изучение движения твердых тел был и значительным и важным. Хотя в целом их построения не соответствовали действительности, именно они сформулировали такие важные понятия, как скорость и ускорение, смутно предугадали существование инерции в теории импульса и даже связали путь и время в равномерно ускоренном движении. Но прежде чем эти проблески понимания, эти зерна истины могли сложиться в ясную научную дисциплину, требовалось сделать два важных шага. Во-первых, надо было освободиться от заблуждения, что скорость свободного падения зависит от веса тела; и во-вторых, следовало приложить умозрительно сформулированные законы равномерно переменного движения к реальному случаю падения тел в поле земного тяготения.

Нетрудно убедиться, что оба эти шага требовали от схоластов как раз того, чего они не могли сделать: выразить свои умозрительные, зачастую весьма туманные рассуждения в строгой математической форме и подтвердить их наблюдением, опытом. Только ясно поняв и осознав это, мы сможем по достоинству оценить значение идей Роджера Бэкона (ок. 1214—1292).

Говоря об этом человеке, популяризаторы науки любят вспоминать его пророчества о чудесных машинах и аппаратах, которые будут изобретены в грядущих веках. И эти пророчества действительно могут поразить воображение. В середине XIII века Бэкон писал о сооружениях, которые появились лишь семьсот лет спустя. «Будут изобретены, — вещал он, — машины для плавания без помощи гребцов, так что громаднейшие корабли будут носиться по воде и управляться одним человеком; устроят повозки, которые будут катиться с невообразимой скоростью без всякой упряжи; будут сделаны аппараты для летания по воздуху; ...будут аппараты для опускания на дно морей и рек без всякой опасности и для плавания под водой и для пребывания там». Но как ни удивительны сами по себе эти предсказания, для нашего повествования гораздо важнее совсем иные его идеи.

В то самое время, когда десятки схоластов высшим признаком учености считали знакомство с трудами Ари-

стотеля, Роджер Бэкон смеялся над притязаниями схоластической науки на всеведение и пророчески указывал: «Люди будущих времен будут знать многое, что не известно нам; придет время, когда потомство будет удивляться, как мы не видели того, что было так ясно».

Для того чтобы совершить такой переворот, твердил Бэкон, необходимо неукоснительно проводить в жизнь два великих принципа: анализировать явления природы с помощью математики, которая есть «дверь и ключ к наукам», и поверять полученные с ее помощью выводы широко поставленными точными экспериментами...

Лишь триста лет спустя естествоиспытатели Западной Европы пришли к пониманию и признанию этих великих принципов истинной науки. И решающую роль в установлении новых воззрений сыграла Реформация — первая еще незрелая буржуазная революция, в которой молодая европейская буржуазия и часть дворянства выступили против католической церкви.

В ходе этой революции оформился протестантизм — третья после католицизма и православия разновидность христианства — и от некогда единой католической системы отпали Англия, Шотландия, Дания, Швеция, Норвегия, Голландия, Финляндия, Швейцария, частично Германия, Чехия и Венгрия. Потери Ватикана могли бы быть еще больше, если бы он, вовремя спохватившись, не организовал Контрреформацию, которой удалось пресечь дальнейшее распространение протестантизма на Европейском континенте и искоренить его в Польше и во Франции. В истории науки эти могучие социальные столкновения нашли любопытное отражение: появилось множество ученых-иезуитов...

«Общество Иисуса» было создано в 1534 году группой монахов во главе с Игнатием Лойолой для обращения неверных в христианство. Но потом, переключившись на борьбу с Реформацией в самой Европе, оно стало своеобразной папской гвардией, не гнушавшейся никакими средствами в деле защиты католичества от любых угроз.

Иезуиты едва ли не раньше всех осознали опасность, которая таилась в грядущем развитии естественных наук, где неотвратимо должен был накапливаться фермент «духовного разложения», питавший буржуазное свободомыслие. Стремясь устранить эту опасность, иезуиты решили сделать с наукой то, что схоласты пытались неког-

да сделать со священным писанием, а именно: привести все новые естественнонаучные открытия в стройную непротиворечивую систему, согласную с учением Аристотеля. Но если в XIII веке основой для систематического изложения христианского вероучения должна была служить логика Аристотеля, то в XVII веке при построении научной системы предписывалось руководствоваться аристотелевской физикой с ее апелляцией к опыту. При этом иезуиты термином «опыт» обозначали явление в том виде, в каком оно открывается органам чувств при самом поверхностном, грубом наблюдении. Порой теоретические построения создавались на самых ходячих взглядах, лишь бы они не были явно ошибочными. При таком подходе нелепости и противоречия были неизбежны, но основатели Общества заранее позаботились о принятии особого устава. В соответствии с ним ученые-иезуиты не имели права публично полемизировать друг с другом и не могли издавать своих трудов без предварительного одобрения руководства. Действуя заодно и сообща, иезуиты над любым ученым, досадившим Ватикану, могли учинить расправу, вроде той, которую они организовали против гениального Галилея...

«О предмете древнейшем наука новейшая»

Имя итальянца Галилео Галилея известно всему человечеству как имя гениального ученого. Современники же знали и ценили его как выдающегося писателя, не уступавшего Макиавелли, как блестящего музыканта и живописца. «Такие люди могут выбирать какие угодно дороги, им не заказаны никакие пути, — писал о Галилее один из его русских биографов Н. Маракуев, — Галилей, подобно Леонардо как по солидности своего высокого ума, так и по блеску и плодovitости воображения, мог бы сделаться, если бы захотел, настолько же великим художником, насколько он был великим ученым».

Избрав науку, Галилей при жизни достиг высочайшей славы и широчайшей известности. Его современники — люди конца XVI — начала XVII века — были ошеломлены картинами, которые знаменитый профессор показал миру через окуляр построенного им самим телескопа. Оказывается, на Луне есть такие горы, как на Земле, а на ослепительном Солнце — пятна! Оказывается, вокруг Юпитера, как Луна вокруг Земли, вращаются це-



Рис. 2. Итальянский ученый Г. Галилей (1564—1642) — создатель науки о движении тел

лых четыре спутника! Оказывается, у Венеры и Меркурия есть такая же смена фаз, как у Луны, а далекий Сатурн наделен таинственным свойством являться взорам земного наблюдателя в «тройственном» виде — таким впервые представилось Галилею кольцо Сатурна.

Удивительно ли, что имя Галилея гремело тогда по всей Италии и за ее пределами; что великий герцог тосканский в 1610 году жалует ученому титул «Первого математика Пизанского университета и придворного философа великого герцога без обязательства преподавать в Университете и жить в Пизе»; что кардинал Барберини — будущий папа Урбан VIII — в 1616 году даже написал поэму, прославляющую Галилея. Но увы, не за горами была та гроза, которой суждено было обрушиться на голову ученого: религиозная борьба в Европе близилась к кровавой кульминации — тридцатилетней войне. И по мере того как приближался 1618 год — год ее начала, католическое духовенство, долго смотревшее на гелиоцентрическую систему Коперника сквозь пальцы, как на математическую гипотезу, лишенную реального содержания и потому не представлявшую опасности, стало относиться к ней все подозрительнее и подозрительнее. А с началом войны политическая ситуация в католическом мире изменилась так резко, что никакие отклонения от официальных взглядов не допускались. И

в число врагов Ватикана, наряду с основоположниками протестантизма Лютером и Кальвином, неожиданно для самого себя попал основоположник механики католик Галилей, который, увы, не имел ни малейшего понятия о политике и был весь захвачен своими научными исследованиями...

История осуждения и унижения Галилея известна достаточно хорошо.

22 июня 1633 года в церкви Санта Мария sopra la Minerva в присутствии множества кардиналов и прелатов коленопреклоненного ученого заставили выслушать так называемую сентенцию — акт осуждения учения Коперника и самого Галилея, а потом произнести клятвенное отречение. Осудив таким образом систему Коперника и унизив ее апостола, папа милостиво заменил Галилею тюремное заключение подобием домашнего ареста на вилле Арчетри неподалеку от Флоренции.

Иезуиты и доминиканцы считали, что это наказание нравственно убьет их грозного противника. Но эти надежды не оправдались. Именно в Арчетри на восьмом десятке лет изолированный от мира Галилей еще раз показал всем, какой мощный ум обитал в его дряхлеющем теле. После пяти лет напряженной изнурительной работы появилось его новое творение — «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению».

Сами того не желая, иезуиты поставили Галилея в такие условия, когда он был вынужден оставить астрономические работы и взяться за самое славное деяние своей жизни — за создание динамики. Деяние, которое знаменитый французский математик и механик Ж. Лагранж (1736—1813) считал главным научным подвигом Галилея. «Открытие спутников Юпитера, фаз Венеры, солнечных пятен и т. д., — писал Лагранж, — требовало только телескопа и прилежания. Но нужен необыкновенный гений, чтобы извлечь законы природы из наблюдений физических явлений, совершающихся перед глазами каждого, но разгадка которых тем не менее доселе не поддавалась усилиям философов».

Сам Галилей тоже ясно осознавал значение сделанных им открытий. Не случайно «День третий» его «Бесед и математических доказательств», изданных в 1638 году, начинается словами торжественными и подчеркнуто гор-

дыми: «О предмете древнейшем создаем мы науку новейшую» *. Сочинение это представляет собой диалоги между четырьмя собеседниками. Сальвиати, Сагрето и Апроино, выражающие мысли самого Галилея, высказывают веские убедительные соображения по разным проблемам механики, четвертый — Симпличио (простец) — отвечает им возражениями аристотелианцев, иезуитов и монахов, с которыми так много приходилось спорить Галилею.

Если сжато сформулировать суть изложенных в его книге открытий, то она сведется к одному: Галилей «очистил» движение тел от влияния сопротивляющейся среды и доказал, что феномен движения не противоречит возможности существования безвоздушного пространства.

Описание опытов флорентийца, бросавшего с наклонной Пизанской башни шары из тяжелых и легких материалов, приводилось в книгах и статьях так часто, что в сознании многих людей укоренилась мысль, будто независимость скорости свободного падения от веса тел была открыта Галилеем едва ли не экспериментально. В действительности это было не так. Достаточно ознакомиться с методологическими взглядами Галилея, чтобы убедиться, что он всегда сначала исследовал проблему логически, а уж потом подтверждал свои выводы опытами. Так же поступил он и при изучении свободного падения.

Предположим, рассуждал он, Аристотель прав, и тяжелые тела падают быстрее, чем легкие. Тогда, присоединив к тяжелому телу легкое, мы должны были бы замедлить его падение. Но ведь суммарный вес обоих тел больше, чем вес одного только тяжелого тела. Следовательно, соединенные вместе тела должны падать быстрее, чем одно только тяжелое. Получается противоречие: связка должна падать одновременно и медленнее, и быстрее, чем отдельно брошенное тяжелое тело. Выход из этого логического противоречия только один: скорость падения всех тел одинакова и не зависит от их веса.

* В отечественном издании «Бесед» (Галилей Г. Избранные труды. Т. 2. М., Наука, 1964, с. 233) эта фраза звучит более прозаично: «Мы создаем совершенно новую науку о предмете чрезвычайно старом». Думается, истинный пафос галилеевских слов более точно передан в цитированных выше словах из книги М. Льюэси «История физики» (М., Наука, 1970, с. 79).

Правда, это рассуждение справедливо только при движении в вакууме...

Удивительный парадокс! Два выдающихся мыслителя из одного и того же наблюдения делают прямо противоположные выводы!

— В пустоте все тела должны падать с одинаковой скоростью, но так как в окружающем нас мире такого не наблюдается, то пустота невозможна, — утверждает Аристотель.

— В пустоте все тела должны падать с одинаковой скоростью, и если в окружающем нас мире такого не наблюдается, то этим «опровергается лишь допущение таких больших пустот, которых ни я, ни древние не представляли себе естественно существующими и которые, возможно, могут быть созданы насильственно»! — возражает Галилей. И с ним трудно не согласиться: его рассуждение, быть может, многословнее и более громоздко, но зато логически более строго.

Как ни прекрасно, как ни изящно само по себе логическое доказательство равенства скоростей падающих тел, вся сила галилеевского гения проявилась в другом — в открытии принципа инерции, одного из самых неочевидных принципов в истории физики. В свое время Аристотель столкнулся с большими трудностями при объяснении торможения тел. Почему приведенное в движение тело останавливается в строго определенной точке — ни раньше и ни позже? И здесь снова сказалось изумительное умение греческого философа делать логические умозаключения и поразительное неумение должным образом их оценивать. Существует пустота, утверждал он, и телу «необходимо или покоиться или бесконечно двигаться, если только не помешает что-нибудь более сильное».

Бесконечное движение, которое для грека было синонимом невозможности вакуума, само по себе не могло устроить Галилея, воображение которого не затруднялось «насильственным созданием больших пустот». Для него гораздо важнее была другая сторона дела: когда на тело перестает действовать сила, оно не обязательно должно тут же остановиться, как считал Аристотель. Если движение происходит в вакууме и отсутствуют все другие виды сопротивления, тело может сколь угодно долго двигаться равномерно и прямолинейно даже тогда, когда сила на него больше не действует. «Я мысленно представляю себе тело, брошенное по горизонтальной

плоскости, — писал Галилей. — Если бы все препятствия были устранены, движение тела сохранялось бы равномерным вечно, если только самую плоскость можно было бы продолжить до бесконечности». Так звучала первая в истории формулировка принципа инерции, разрешившая впоследствии загадку горизонтального движения!

Иезуитские эксперименты иезуитов

Долгое время считалось, что возбуждение судебного процесса против Галилея — дело рук иезуитов. Лишь в нашем столетии стало известно, что главными зачинщиками процесса были доминиканцы. И это легко объяснимо: с 1232 года, ведая делами инквизиции, доминиканцы и к Галилею отнеслись как к обычному еретику, против которого годились все привычные им средства — заключение, унижение, допросы, а если понадобится, то и оковы и даже пытки...

Иезуиты были умнее. Победа, которую они жаждали одержать над Галилеем, должна была быть более убедительной, более прочной и более почетной, нежели та, которая достигалась формальным осуждением и вынужденным покаянием. Короче, это должна была быть духовная победа, основанная на доказательной силе опыта. Иезуитов не пугали и не могли пугать научные факты, взятые сами по себе. Они понимали, что бессмысленно отрицать очевидное. Несоответствие фактов делаемым из них выводам — вот куда следовало, по их мнению, направлять главный удар. И в этом разгадка того, казалось бы, странного двойственного отношения ученых-иезуитов к открытиям Галилея.

В отличие от монахов и догматиков-богословов иезуиты не подвергали сомнению астрономические факты, открытые Галилеем. Они не отказывались взглянуть в телескоп; иезуитская коллегия в Риме во главе с отцом Клавио подтвердила все наблюдения Галилея; а астроном — иезуит Шейнер даже вступил с ним в приоритетные споры по поводу открытия солнечных пятен. Совсем иначе отнеслись иезуиты к основам динамики, изложенным в «Беседах и математических доказательствах»...

О Галилее нередко говорят как об основоположнике экспериментального метода в науке, но это нельзя понимать в том смысле, что до него эксперимент не применялся вообще — мы уже знаем, что и сам Аристотель

апеллировал к опыту, к тому, что встречается в природе. Заслуга Галилея в другом.

«Природа дала нам глаза, чтобы мы узрели ее творения, — твердил он своим ученикам. — Но она наделила нас также мозгом, способным понять эти творения». Начав с наблюдения, с «чувственного опыта», привлекающего наше внимание к той или иной группе явлений, необходимо переходить потом к «рациональному обсуждению» — то есть разумом очищать явление от побочных эффектов, отбрасывать несущественное, настойчиво искать ту сокровенную физическую суть, которая одна только и может позволить построить то, что сам Галилей называл аксиомой, Пастер — предвзятой идеей, а современные ученые — рабочей гипотезой.

Затем следует «математическое развитие», то есть вывод логических следствий из принятой гипотезы, в котором главную роль играют не путанные теории аристотелианцев, а строгие математические доказательства. И только после этого вступает в силу эксперимент — опытная проверка следствий, выведенных с помощью математики из рабочей гипотезы. Опытная проверка — высший и окончательный критерий истинности — венчает открытие. Здесь от ученого требуется максимальная изобретательность, внимание, тщательность, терпение и присутствие духа. Он должен придумать эксперимент, повторить его несколько раз, уловить в неточных экспериментальных данных математические закономерности, предусмотреть новые эксперименты для подтверждения сформулированных законов.

И все-таки, уделяя такое внимание и придавая такое значение эксперименту, Галилей никогда не упускал из виду, что от опыта нельзя ожидать математической точности, ибо свойства испытываемых в эксперименте тел могут сильно отступать от принятых допущений. Поэтому над самыми строгими математическими выводами и над самыми тщательными экспериментами у Галилея всегда царит отчетливое понимание физического смысла. И ясность понимания, логичность разбора явления и последовательность рассуждений в трудах Галилея были таковы, что, казалось, делали ненужной, излишней самое экспериментальную проверку. Как современники, так и более поздние исследователи порой сомневались в том, что сам Галилей действительно ставил эксперименты для проверки результатов, полученных изумительно

простым и убедительным рассуждением. И в это можно поверить, читая бессмертные «Беседы». Когда протестант — Симплицио — спросил, видел ли кто-нибудь своими глазами опыт, опровергающий соображение Аристотеля о более быстром падении тяжелого камня, Сагрето с пылкостью ответил ему:

— Но я, синьор Симплицио, не производивший никаких опытов, уверяю вас, что пушечное ядро весом в сто, двести и более фунтов не опередит и на одну пядь мушкетной пули весом меньше полуфунта при падении на землю с высоты двухсот локтей.

После этого следовало приведенное ранее логическое объяснение причины, по которой тела разного веса должны падать с одинаковой скоростью.

По всей вероятности, восклицание Сагрето натолкнуло иезуитов на мысль, что изложенные в «Беседах» основы динамики — чисто математическая гипотеза, не имеющая под собой солидного экспериментального обоснования. Поэтому динамике Галилея они вознамерились нанести смертельный удар именно с этой стороны, показав ее несоответствие очевидным опытным фактам. Так возникла парадоксальнейшая ситуация: церковники решили уличить основателя современной динамики в том, что его утверждения не подтверждаются опытными данными!

Конечно, трудно предположить, чтобы Галилей упустил простую и заманчивую возможность проверить свои теоретические выводы на опыте. Современные историки науки установили, что эксперименты с шарами разного веса, бросаемыми с башен, проводил не только сам Галилей, но и его ученики Дж. Бальяни в 1611 году и В. Раньери в 1641-м. Но, вне всякого сомнения, наиболее подробные и скрупулезные эксперименты с падением шаров раньше всех провел иезуит Дж. Риччоли (1598—1671) и его помощники — будущий открыватель дифракции света Фр. Гримальди и Н. Кабео — в 1640, 1645 и 1648 годах.

Уроженец Феррары Риччоли затеял опыты с бросанием глиняных шаров с 80-метровой башни Азинелли в Болонье. Но, увы, вопреки упованиям экспериментатора эти опыты не опровергли галилеевских законов свободного падения. К удивлению иезуита, как расстояния, пройденные за известные отрезки времени, так и время их прохождения неизменно подчинялись закономерности,

предначертанной великим флориентийцем. Будучи опубликованными, эти измерения, вместо опровержения законов свободного падения, стали первым в истории полным и убедительным их экспериментальным обоснованием.

Тогда обескураженный Риччоли провел серию опытов с шарами, сильно различающимися по весу, и тут действительно обнаружил некоторые расхождения. Сброшенные с одной высоты тяжелые шары достигали земли несколько раньше, чем легкие. Радостно ухватившись за это расхождение как за подтверждение аристотелевского принципа — тяжелые тела падают быстрее легких, — Риччоли в надежде поставить под сомнение всеобщность галилеевых законов опубликовал данные и этих своих измерений. Увы, он даже не подозревал, что и тут он попадет впросак...

Удивительно, но факт: описав в «Беседах» как раз такие опыты, какие были поставлены Риччоли, Галилей заявлял, что действительно, падая с высоты ста локтей, больший шар опередит меньший на два пальца. «И этими двумя пальцами, — восклицал он устами Сальвиати, — вы хотите закрыть девяносто девять локтей Аристотеля и, говоря о моей небольшой ошибке, умалчиваете о громадной ошибке другого». Но Галилей не был бы Галилеем, если бы своей ясной анализирующей мыслью не проник в тайну даже этого незначительного расхождения.

В «Дне четвертом» его «Бесед» Сальвиати дает исчерпывающее объяснение, почему легкое тело при падении в воздухе отстает от тяжелого. Чем больше скорость движения, говорит он, тем больше и сопротивление движению, оказываемое воздухом. Поэтому, непрерывно убыстряясь в начале падения, тело испытывает со стороны воздуха все более сильное противодействие своему движению, и когда сопротивление сравнится с весом, движение станет однообразным и равномерным. «Подобный результат обнаружится тем скорее и при тем меньшей высоте, чем меньше будет вес тела»... В этом исчерпывающе ясном, кратком объяснении таилась целая программа для экспериментаторов, которых издавна побуждали к подобным исследованиям артиллеристы...

Глава II. ИСКУССТВО БРОСАТЬ ЯДРА



поминания об артиллерии появляются в середине XIV века. Одни утверждают, что первые «гремящие самопалы» применили арабы против испанцев при осаде последними города Альхесирас в 1342 году. Другие считают, что огнестрельное оружие впервые было применено в 1365 году, когда защитники крепости Эйнеб в Германии отстреливались от осаждавших из «громовых ружей». В XV веке турки уже широко применяли бомбарды при осаде Константинополя, а французский король Карл VIII в войне за наследственные права на Неаполь собрал при своей тридцатитысячной армии более сотни орудий различных типов.

К началу XVI века артиллерия прочно вошла в систему вооружения средневековой Европы, и хотя в это время было уже немало профессиональных канониров, она достигла уровня, при котором не могла уже обходиться навыками, полученными только из практического боевого опыта. В отличие от других ремесел, где ошибочность теоретических представлений не вела к катастрофическим последствиям, в артиллерии дело обстояло иначе. Абстрактные рассуждения, прежде интересовавшие только схоластов, приобрели здесь поистине «убийственную» важность. Артиллерист, не желавший привести свои теоретические представления в соответствие с опытом, рисковал в любой момент оказаться в положении того пушкинского майора, который «летел навстречу славы, а встретился с ядром».

Ядра и пули не только разрушали рыцарские замки и проламывали рыцарские панцири. Артиллерия, образно говоря, подвергла жестокому «огневому воздействию» пренебрежительное отношение древнегреческих философов к практическим потребностям общества. В XVI веке под напором суровых требований именно артиллерии умо-

зрительная наука впервые начала обращаться к задачам эмпирической техники. И в истории сохранилось прямое указание на то, как это произошло.

**«Летел навстречу славы,
а встретился с ядром»**

«Когда я жил в Вероне в 1531 году, один из моих близких друзей, канонир из старого замка... спросил однажды моего мнения, каким способом следовало бы направить артиллерийское орудие, чтобы оно дало наибольшую дальность? Я принялся изучать предмет... и дал мои заключения, выведенные из рассуждений *как основанных на природе явлений, так и на геометрии* (курсив мой. — Г. С.). Они привели меня к тому результату, что стволу орудия должно придать возвышение над горизонтом, отвечающее 45 градусам».

Трудно найти документ, который более ярко, чем эти слова итальянца Никколо Тарталья, свидетельствовал бы о переменах в западноевропейской науке, вызванных двухсотлетним развитием артиллерии.

Занявшись задачей, предложенной веронским канониром. Тарталья предположил, что дальность полета ядра будет равна нулю как при максимальном угле возвышения — 90° , так и при минимальном — 0° . Следовательно, решил он, наибольшая дальность будет достигнута при каком-то промежуточном значении угла возвышения. Но при каком?

И вот тут математик Тарталья делает не строгое, а лишь правдоподобное предположение: наибольшая дальность достигается тогда, когда ствол займет среднее положение между двумя крайними, то есть будет направлен под углом 45° к горизонту. Ученый спешит проверить свой вывод на практике. Будучи чистым математиком, Тарталья не мог сам проводить эксперименты, поэтому вынужден был опираться на сведения, которые ему сообщали артиллеристы-профессионалы. А они заверили его, что практическая стрельба подтверждает его теорию: ядро 20-фунтовой кулеврины при угле возвышения 45° залетело дальше, чем при угле 30° .

Это совершенно случайное совпадение чисто умозрительных математических предсказаний с результатами всего двух выстрелов, сделанных при разных углах возвышения, сослужило науке плохую службу. Оно укрепи-



Рис. 3. Итальянский математик Н. Тарталья (ок. 1499—1557)— первый исследователь траекторий артиллерийских снарядов

ло Тарталью в мысли, будто требующиеся артиллеристам-практикам данные для стрельбы можно вычислить математически из чисто геометрических построений. «Зная одну-единственную дальность какого-либо орудия, — писал он в 1546 году, — я в состоянии построить таблицу всех дальностей этого орудия под всеми углами возвышения...; благодаря этой таблице всякий, кто будет иметь ее перед глазами, не только сумеет стрелять из этого оружия, но сможет заставить стрелять из него наиболее невежественного канонира...» Правда, для вычисления таких таблиц необходимо знать, как выглядит траектория полета ядра в воздухе. Не мудрствуя лукаво, Тарталья предположил, что траектория полета в первом приближении состоит из двух прямолинейных ветвей — наклонной восходящей и вертикальной нисходящей, — сопряженных между собой дугой окружности.

Таблицы стрельбы, построенные на основе таких весьма грубых представлений, давали слишком ненадежные данные, чтобы можно было руководствоваться ими в бою.

Тарталья сразу взялся за решение самого сложного случая: исследование полета ядра в сопротивляющейся среде под углом к горизонту, то есть участвующего одновременно в двух движениях — горизонтальном и вертикальном. Если учесть, что ученый не имел ясного пред-

ставления ни о законах свободного падения, ни о механизме воздушного сопротивления, ни о процессах торможения тел под действием этого сопротивления, то можно только поражаться тому, что его таблицы давали хоть какое-то приближение к действительности. И все-таки за неимением лучшего теория Тартальи получила широкую известность и излагалась во многих руководствах по артиллерии. Конечно, не замедлили явиться попытки усовершенствовать ее, с тем чтобы составить более точные и надежные таблицы стрельбы. В каких же направлениях велись работы по совершенствованию теории Тартальи?

Легко понять, что таких направлений могло быть только три. Во-первых, можно было, не особенно вникая в физическую суть дела, достичь лучшего соответствия с действительностью, более удачно подобрав элементы траектории. Во-вторых, можно было пойти по пути существенного упрощения задачи: разом отбросив все трудности, связанные с влиянием сопротивляющейся воздушной среды, сосредоточить внимание на исследовании идеальной картины движения ядра в безвоздушном пространстве. Такому исследованию должно было предшествовать изучение двух важнейших частных случаев — свободного падения по вертикали и горизонтального движения под действием импетуса. Наконец, в-третьих, можно было, не заботясь о траекториях, сосредоточить внимание на процессах, которыми, собственно, и отличается реальная картина полета ядра от идеальной: на сокровенных механизмах аэродинамического сопротивления, возникающего при взаимодействии движущегося тела с обтекающим его воздухом. Исследования по всем этим трем направлениям как раз и составили содержание артиллерийской науки на протяжении последующих столетий. Хронологически первыми были, естественно, попытки профессионалов-артиллеристов пойти по самому легкому пути: подправить теорию Тартальи, не затрагивая ее основ...

После 1546 года, когда в свет вышел второй труд Тартальи «Исследования и различные изобретения, касающиеся артиллерии», как из рога изобилия посыпались трактаты, авторы которых, норовившие уточнить учение итальянца, проявили немало изобретательности в выдумывании весьма замысловатых траекторий. Но, увы, в самом чисто эмпирическом методе формального под-

бора таились глубокие противоречия, которые обнаружились в работах преемников Тарталья в виде вопиющего расхождения между теоретическими предсказаниями и результатами опытных стрельб.

Второй путь — исследование полета ядра в вакууме — был полностью пройден одним человеком — Галилеем, хотя и у него был предшественник: миланец Бонавентура Кавальери (1598—1647) опередил его на шесть лет. В 1632 году он опубликовал трактат, в котором доказал: «Тяжелые тела, брошенные с какой-нибудь силой в произвольном направлении... описывают после прекращения действия на них силы кривую линию, отличающуюся от параболы неощутимым образом, если не принимать во внимание сопротивления среды». Кавальери был учеником и почитателем Галилея; в своем трактате он ссылаясь и воздавал должное достижениям своего учителя; но и его вклад был самостоятелен и значителен.

Однако Галилей, крайне недовольный тем, что ученик не получил его предварительного согласия на публикацию своих результатов, по всей вероятности, сделал ему весьма резкий выговор: после 1632 года Кавальери бросил занятия механикой и переключился на чистую математику. И, думается, учитель в данном случае был прав: параболичность траектории движущегося в вакууме тела автоматически вытекала из открытых Галилеем законов свободного падения и равномерного прямолинейного движения. А вот их-то было невозможно открыть без замечательной проницательности Галилея, которая дала ему возможность преодолеть укоренившиеся за двадцать столетий заблуждения Аристотеля.

Читая «Беседы и математические доказательства», начинаешь понимать, почему в 1632 году Галилей рассердился на Кавальери: не откладывая дела в долгий ящик, ученик сделал то, что, по-видимому, собирался, да не смог за занятостью сделать учитель. Лишь в 1638 году Галилей опубликовал свои соображения. Если горизонтальная «плоскость конечна и расположена высоко, то тело, имеющее вес, достигнув конца плоскости, продолжает двигаться далее таким образом, что к его первоначальному равномерному беспрепятственному движению присоединяется другое, вызываемое силою тяжести, благодаря чему возникает сложное движение...» При таком сложном движении, слагающемся из равномерного

горизонтального и равномерно ускоренного вертикального, бросаемое тело описывает полупараболу, а не те замысловатые комбинации из всевозможных кривых и прямых линий, которые рисовались воображению артиллеристов-практиков.

После галилеевских «Бесед и математических доказательств» не могло оставаться ни тени сомнений в том, что теоретически наибольшая дальность стрельбы должна достигаться при угле возвышения 45° и что при углах, равноотстоящих от 45° , должны получаться одинаковые дальности. Хотя сами по себе эти утверждения уже не могли считаться новыми — их смутно угадывал Тарталья, — Галилей ясно понимал необходимость строгого доказательства. В уста Сагрето он вложил такие слова: «Удивительна и вместе с тем восхитительна сила убедительности, которая присуща одной лишь математике. Я уже был знаком со слов опытных бомбардиров с тем фактом, что из всех выстрелов... наиболее дальнобойным... является тот, который производится при угле, равном половине прямого... Но понимание причины, по которой это происходит, дает неизмеримо больше, чем простое сведение, взятое из показания других лиц или даже из многократно повторенного опыта».

Таким образом, только через сто лет после того, как веронский канонир задал Тарталье свой вопрос, западноевропейская наука сделала первый действительно важный для артиллерийского дела шаг: установила, что в пустоте ядро, брошенное под углом к горизонту, движется по параболе! Тем не менее артиллеристы-практики не восприняли всерьез параболическую теорию, пренебрежительно отзываясь о ней как о «мираже геометров». И их трудно осудить за такое отношение. «Не следует удивляться, что солдаты мало использовали теорию, которая, как бы хороша она ни была, во многих отношениях, к несчастью, противоречила опыту», — писал прусский артиллерист Г. Темпельгоф.

Опыт практиков подтверждался и экспериментами ученых: в 1675 и 1677 годах Лондонское Королевское общество провело опытные стрельбы из лука, которые показали, что, вопреки параболической теории, наибольшая дальность получается при углах, меньших 45° ; а дальности при углах, равноотстоящих от 45° , получаются не одинаковыми: при меньших углах снаряд всегда летел дальше, чем при больших.

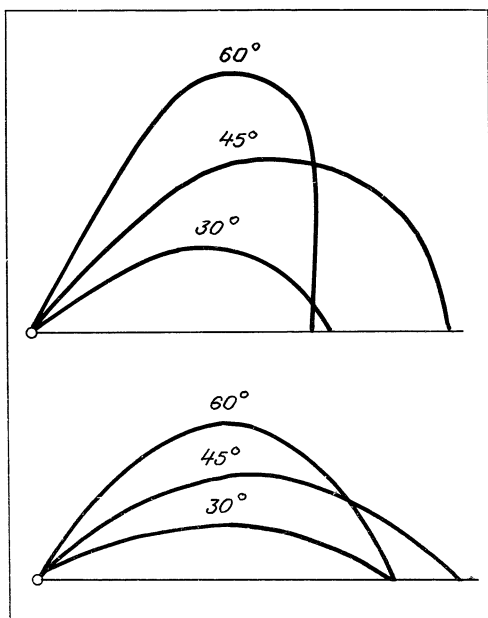


Рис. 4. Так выглядят траектории ядер, брошенных под разными углами к горизонту по теории Тарталья (вверху) и Галилея (внизу)

Вот почему артиллеристы не спешили переходить к таблицам, построенным на параболической теории, предпочитая им прежние таблицы, хотя и не основанные на настоящем научном фундаменте, но дававшие неплохое приближение, когда цели имели большую площадь.

Положение изменилось во второй половине XVII века, когда в практике осадной и крепостной артиллерии стали широко применяться мортиры, стреляющие тяжелыми ядрами по навесной траектории. Именно тогда выяснилось, что прежние эмпирические таблицы, дававшие более или менее удовлетворительные результаты при стрельбе из длинноствольных орудий — кулеврин и фальконетов, — совершенно не годились при стрельбе из короткоствольных мортир. Для таких орудий гораздо лучшие результаты давала параболическая теория — тот самый «мираж геометров», о котором некогда с таким пренебрежением отзывались артиллеристы-практики.

Причина расхождений между идеальными параболическими траекториями Галилея и действительными траекториями, интересующими артиллеристов, не могла составлять секрета. Ведь главное различие между mortарой и пушкой — различие в начальной скорости ядра: при выстреле из пушки она была в несколько раз выше, чем при выстреле из mortары. А чем меньше эта скорость, тем меньшее сопротивление оказывает воздух движению ядра, тем ближе его траектория к идеальной параболе, по которой двигалось бы это ядро в безвоздушном пространстве. Наоборот, чем быстрее вылетает ядро из ствола, тем сильнее отдалается его действительная траектория от параболической.

Вот почему, идя навстречу практическим нуждам артиллерии, многие исследователи во второй половине XVII века сконцентрировали свое внимание на третьем из упомянутых выше направлений — на изучении самого механизма сопротивления, оказываемого воздухом движущемуся ядру.

«Испытывая и снова испытывая»

Если кары, обрушенные инквизицией на голову Галилея, научили чему-нибудь ученых Западной Европы, так в первую очередь тому, что с церковью — все равно католической или протестантской — шутить опасно и что самый надежный способ избежать неприятностей — только изучать факты, но не истолковывать их. Именно поэтому во второй половине XVII века наука сосредоточила внимание исключительно на опытных исследованиях. Так, возникшая в 1657 году во Флоренции знаменитая Академия дель Чименто, избрав своим девизом слова Данте «Испытывая и снова испытывая», не оставила после себя никакого теоретического направления и ограничилась бессвязным набором экспериментальных исследований. Только «развитием физико-математического знания» желали ограничить деятельность своей корпорации основатели Лондонского Королевского общества, в 1660 году начертавшие на его гербе девиз из Горация: «Ничего на веру».

«Развивать посредством опытов естествознание и полезные искусства, мануфактуры, практическую механику, машины, изобретения, не вмешиваясь в богословие, метафизику, мораль, политику, грамматику, риторику и ло-

гику», — к этим словам знаменитого Роберта Гука с готовностью присоединились бы организаторы подобных обществ во Франции, Германии, Италии. Вот почему в первые десятилетия после смерти Галилея не было недостатка в экспериментаторах, жаждавших найти количественные закономерности в тех проблемах, которым он дал такое блестящее объяснение на чисто качественном уровне, и прежде всего это относилось к свободному падению тел в сопротивляющейся среде.

Среди экспериментаторов прежде всего были флорентийские академики, описавшие в двенадцатой главе единственного тома своих «Трудов» проведенные ими исследования. Затем за дело принялся французский ученый-иезуит К. Дешаль (1621—1678) — математик и физик, известный как первый издатель Евклида во Франции и как исследователь, который провел тысячу опытов по свободному падению.

Хотя эксперименты Риччоли, флорентийских академиков и Дешаля не открыли ничего нового по сравнению с тем, что давали законы Галилея, они, если так можно выразиться, привили ученым вкус к исследованию новых сторон свободного падения тел в пустоте, воздухе и воде. На протяжении почти 250 лет, начиная с середины XVII века и кончая началом XX, ученые разных стран время от времени ставят все более и более точные опыты, в ходе которых постепенно накапливается тот экспериментальный материал, который является фундаментом всякого сколько-нибудь серьезного научного обобщения. Среди добывателей фактов, извлекаемых из опытов свободного падения, мы видим наряду со сравнительно малоизвестными учеными — Гауксби, Бенценбергом, Рейхом — и великих корифеев науки — Ньютона, Менделеева, Жуковского. А открывает этот список Эдм Мариотт, имя которого всем нам знакомо из школьной физики по закону Бойля — Мариотта.

Уроженец Бургундии Эдм Мариотт (1620—1684) рано принял духовное звание и всю жизнь был настоятелем монастыря Сен Мартин Су Бон близ Дижона. Этот увлеченный и увлекающийся человек в 1666 году стал одним из основателей и первых членов Парижской академии наук, первый том трудов которой украшен множеством его статей: о природе цвета, о барометре, о растворах воздуха в воде, о замерзании воды и о разнице между теплом и холодом.

В 1677 году Мариотт издал в Париже небольшой «Трактат о соударении тел», в котором описаны проведенные им опыты свободного падения. Зажав между двумя пальцами два шарика, исследователь одновременно выпускал их. Один — груз полусекундного маятника — начинал отсчитывать время; другой устремлялся вниз. По удару о препятствие, установленное на точно отмеренном расстоянии от точки начала падения, определялось время падения, причем делалась поправка на скорость звука. Опыты проводились в парижской обсерватории, где свинцовые, восковые, пробковые и золотые шарики диаметром от 13,5 до 27 мм падали в сквозное свободное пространство винтовой лестницы с башни обсерватории в ее подвалы. Эти опыты наглядно показали, как велика может быть разница в скоростях падения легких и тяжелых шаров в воздухе. Предельная постоянная скорость, достигаемая свинцовым шариком диаметром 13,5 мм, составила 45,5 м/с, а для легкого пробкового шарика диаметром 27 мм она оказалась равной всего лишь 10,1 м/с.

Следующим «шаробросателем» стал И. Ньютон, который не только лично провел обширные опыты с падением шаров, но и привлек к подобным экспериментам двух помощников. Первым из них был искусный экспериментатор Лондонского Королевского общества Ф. Гауксби (1650—1713), известный своими исследованиями в области электричества. В июне 1710 года он вместе с Ньютоном провел опыты, бросая шары в соборе св. Павла в Лондоне с высоты 67 м. Шары были изготовлены из стекла — диаметром 20 мм, наполненные ртутью, и диаметром 130 мм, наполненные воздухом.

Еще более эффектными были эксперименты второго ньютонова помощника Ж. Дезагюлье (1683—1744) — геолога, оксфордского профессора, читавшего лекции по физике и в других университетах и под конец жизни ставшего капелланом наследника английского престола. Дезагюлье много занимался исследованиями статического электричества, кстати, именно он ввел в научный обиход термин «электропроводник». В 1719 году Ньютон и Дезагюлье провели в соборе св. Павла еще серию опытов, в которых свиные пузыри и свинцовые шары весом около 900 г падали с высоты 83 м.

В этом же году Дезагюлье продемонстрировал королю Георгу I и его свите поразительный эксперимент... В

галилеевых «Беседах» простец — Симпличио, полемизируя с Сальвиати, восклицает: «Я никогда не поверю, что бы в пустом пространстве, если только в нем можно наблюдать падение, клочок шерсти двигался с такою же быстротою, как кусок свинца!»

«А почему бы и нет?» — подумал Дезагюлье. Воздушные насосы достигли к тому времени достаточного совершенства, а апелляция к королю обещала финансирование, необходимое для изготовления «протяженной пустоты» — стеклянной трубы длиной около 5 м. Откачав из нее воздух, Дезагюлье показал, а потому и убедительно доказал: золотая монета и кусок бумаги достигли дна трубы одновременно. А в наполненной воздухом — бумага отстала от монеты на половину высоты трубы. Поскольку измерений не производилось, эксперимент Дезагюлье имел чисто демонстрационное значение.

Забегая вперед, укажем, что эксперименты с падением шаров продолжались вплоть до 1880-х годов, хотя и не все они ставились с целью получить данные для измерения аэродинамического сопротивления. Так, еще неаполитанец Дж. Борелли (1608—1679) догадывался, что падающее с высокой башни тело должно вследствие вращения Земли отклоняться к востоку. Позднее подобную же мысль высказал Ньютон, и в 1789 году итальянец Дж. Гульельмини (? — 1817), вычислив, что при падении с высоты собора св. Петра в Риме отклонение должно составить около 12 мм, начал готовиться к экспериментам. Они были проведены в 1790—1791 годах на башне Азинелли в Болонье, на которой некогда экспериментировали Риччоли и Гримальди. К своему удивлению, Гульельмини, кроме восточного, обнаружил еще и таинственное южное отклонение. Этот результат вызвал в научных кругах большие кривотолки, что побудило профессора физики и математики Дюссельдорфского лицея и основателя обсерватории близ Дюссельдорфа И. Бенценберга (1777—1846) предпринять более тщательные эксперименты.

Первая серия из 31 опыта была произведена в 1802 году в Гамбурге внутри колокольни св. Михаила. Шары из тяжелого свинцового сплава диаметром 33 мм сбрасывались с высоты 77 м, причем ценной особенностью этих экспериментов было то, что фиксировалось не только время бросания и падения, но и время пролета промежуточных точек. В опытах Бенценбергу удалось зафиксиро-

ровать восточное отклонение величиной около 9 мм и южное — 3,4 мм. Повторные опыты, проведенные в следующем году в каменноугольной шахте в Шлебуше, дали аналогичные результаты.

Наиболее точные эксперименты этого рода повторил в 1833 году немецкий физик Ф. Рейх (1799—1882). Шары из олова, свинца и кости диаметром от 28 до 40 мм он бросал на дно одной из знаменитых фрейбургских шахт, глубина которой составляла 158 м. Эти эксперименты положили конец разговорам о южном отклонении, а для восточного дали значения, считающиеся самыми точными: по 106 бросаниям при высоте 158 м оно составило 28,3 мм.

Хотя эти грандиозные эксперименты и содержали данные, по которым можно было оценивать сопротивление воздуха, они преследовали иные цели и из-за сравнительно высоких скоростей падения были не очень-то удобны для измерения нужных величин. Поэтому исследователи, интересующиеся собственно сопротивлением, предпочитали изучать падение шаров в жидкостях, где постоянная скорость устанавливается быстрее, чем в воздухе.

Так, Ньютон экспериментировал с деревянным сосудом высотой 3—4,5 м, наполненным дождевой водой. В этот сосуд он бросал восковые шары диаметром 18—32 мм с вплавленным в них свинцом. В зависимости от веса они достигали скоростей 0,06—0,74 м/с. После Ньютона подобные опыты были проведены лишь в 1811—1815 годах шведами П. Лагерхьельмом, Й. Форселесом и Г. Кальстениусом: в деревянном сосуде высотой около 9 м они заставляли тонуть шары диаметром от 31 до 90 мм из олова и дерева, утяжеленного свинцом. Достигаемые в опытах скорости составляли 0,27—1,08 м/с. Зимой 1879—1880 года опыты с шарами провел Д. И. Менделеев: латунный шар диаметром 40 мм тонул в цилиндрическом сосуде, наполненном водой, достигая предельной скорости порядка 0,16 м/с.

Итак, за двести лет накопился довольно большой опытный материал. Но что означали полученные в экспериментах пестрые цифры? Проливали ли они свет на величину сопротивления, оказываемого средой движущемуся телу? Ведь исследователи не измеряли непосредственно саму силу сопротивления, а только отрезки времени, за которые шары проходили определенные рассто-

яния. Из сопоставления полученных данных они могли установить момент, когда вес падающего тела уравновешивается силой сопротивления; достигнутая к этому моменту скорость в дальнейшем остается постоянной. Но это все!

Для того чтобы сопоставить между собой результаты всех опытов, чтобы сравнить результаты разных исследователей, требовалась идея, принцип, способный придать осмысленность накопившемуся экспериментальному материалу. И XVII век дал миру ученого, который попытался сформулировать такой принцип — первую теорию гидроаэродинамического сопротивления...

Теоретики-гидродинамики и практики-гидравлики

«Биографы Ньютона удивляются, — писал А. Герцен в 1846 году, — что ничего не известно об его ребячестве, а сами говорят, что он в восемь лет был математиком, то есть не имел ребячества». Не совсем точный по форме — Ньютон в детские годы не обнаруживал исключительных математических способностей — Герцен прав по существу. Маленький Исаак не любил пустых забав. Начав с постройки игрушечных мельниц, он перешел к сооружению водяных часов и самоката собственной конструкции. Говорят, что он первым — по крайней мере в Англии — стал запускать воздушные змеи, выбор наиболее выгоднейших форм и размеров которых способствовал развитию его исследовательского таланта. Именно это увлечение натолкнуло Ньютона на мысль провести опыт, который сам он считал своим первым научным экспериментом: желая измерить силу ветра во время бури, 16-летний Исаак измерял дальность своего прыжка по направлению и против направления ветра...

Если история эта верна, то трудно найти пример, который более ярко иллюстрировал бы всю сложность проблемы воздушного сопротивления: гениальный ученый, «украшение рода человеческого», «сверхъестественный разум», как называли его современники, оказался не в силах решить ту первую научную проблему, которая привлекла его внимание на заре юности! А ведь Ньютона эта проблема не переставала волновать всю жизнь, он подступал к ней с разных сторон. Но хотя ему удалось продвинуться в ее понимании достаточно далеко,

окончательное решение все-таки ускользнуло от него. Впрочем, неудачу на этом пути потерпел не он один...

Имя М. Мерсенна (1588—1648) сохранилось в истории науки, потому что в первой половине XVII века его дом в Париже был своеобразным научным центром тогдашней Европы. Сюда из разных стран приходили письма сотен ученых, которых привлекал искренний интерес хозяина дома к науке, его гостеприимство и возможность обсудить здесь ту или иную проблему с понимающими людьми. Хотя сам Мерсенн не прославил себя особо глубокими научными открытиями, он был любителем науки в высшем, благороднейшем смысле слова: он понимал и любил математику, первым измерил скорость звука в воздухе, сделал многое в акустике и кое-что в гидравлике и в изучении маятников, едва не изобрел зеркальный телескоп. Именно Мерсенн в 1644 году впервые применил термин «баллистика» для обозначения науки о полете артиллерийских снарядов.

Полетом ядер в пространстве Мерсенн начал интересоваться еще в 1630-х годах; и некоторые историки полагают даже, что он разработал параболическую теорию одновременно и независимо от Галилея. Но что за уровень был у этих разработок! В отличие от неукоснительно строгого логического развития посылок у Галилея в трудах Мерсенна мы находим хаотическое собрание догадок, грубых опытов и нелепых выводов из них. Так, параболическая траектория выводится из описания полета пули, выстреленной вертикально вверх скачущим на коне всадником. Желая выяснить влияние вращения Земли на траекторию падающего с большой высоты тела, Мерсенн провел опытные стрельбы из мушкета вертикально вверх. Не обнаружив на земле ни одной упавшей пули, он пришел к выводу, что они «задерживаются на небе»...

Тем не менее вклад Мерсенна в баллистику достаточно весом: именно он в 1644 году пошел по тому третьему направлению, о котором упоминалось выше. Пытаясь установить, от чего зависит сила сопротивления, испытываемая летящим ядром со стороны воздуха, он смутно угадывал, что сопротивление тем больше, чем быстрее движется тело, чем больше его поперечное сечение и чем плотнее среда, в которой оно движется.

В том же 1644 году попробовал одолеть эту же задачу Р. Декарт (1596—1650) — знаменитый французский

философ, математик и ученый, изобретатель прямоугольных — декартовых — координат. Возможны два случая, утверждал Декарт: движение тела в эфире и в физической жидкости вроде воздуха и воды. Поскольку частицы эфира очень мелкие и мчатся со скоростями, значительно превышающими скорость самого движущегося тела, оно вообще не будет испытывать сопротивления, ибо эфирные частицы действуют на него равномерно со всех сторон. В физических жидкостях частицы гораздо крупнее и движутся медленнее. Они чаще ударяются о лобовую часть тела, где вследствие этого создается как бы уплотнение, а за хвостовой, наоборот, — разрежение. Частицы, устремляясь от уплотнения к разрежению, обтекают тело и создают вихри. На их создание расходуется часть движения тела, и это есть главная причина возникающего сопротивления, в конце концов останавливающего тело. Что касается величины сопротивления R , то она, по мнению Декарта, должна быть пропорциональна первой степени скорости V ($R \sim V$).

Из этого описания видна коварная особенность объяснений Декарта: в общих чертах в них иногда довольно правильно отражался механизм явления, но только в общих чертах. Никаких количественных предсказаний из гипотез не выводилось.

Раздвоение исследований по воздушному сопротивлению на чисто теоретическое и чисто опытное направления раньше всех попытался преодолеть голландский механик, физик и математик Х. Гюйгенс (1629—1695) — первый иностранный член Лондонского Королевского общества и первый председатель Парижской академии наук. Среди проблем, волновавших ученых XVII века, трудно найти такую, которой не коснулся бы ясный и изобретательный ум Гюйгенса. Он занимался математическим исследованием циклоиды, логарифмической и цепной линии; ему принадлежит одна из первых работ по теории вероятностей. С помощью изготовленного им самим объектива для телескопа он открыл спутник и кольцо Сатурна. Ему принадлежит волновая теория света, объясняющая оптические явления, которые не дались самому Ньютону. Но в памяти потомства имя Гюйгенса оказалось навсегда связанным с разработкой теории измерения времени, положившей начало всем современным маятниковым часам.

В 1668—1669 годах «величайший часовой мастер

всех времен», как потом называли Гюйгенса, путем чисто умозрительных рассуждений пришел к выводу, что сопротивление воздуха или воды движению твердого тела должно быть пропорционально не первой степени скорости, как думал Декарт, а второй. Для проверки этого рассуждения Гюйгенс провел эксперименты, в которых деревянный цилиндр буксировался под водой падающим грузом. Сопоставив скорости установившегося равномерного движения тела с соответствующими величинами груза, Гюйгенс получил первое в истории опытное подтверждение того, что сопротивление пропорционально квадрату скорости. К сожалению, эти исследования не были опубликованы при жизни Гюйгенса и впервые увидели свет только в девятнадцатом томе его собрания сочинений, вышедшем в 1937 году, то есть через 270 лет. Вот почему слава этого важного открытия досталась Ньютону, самостоятельно пришедшему к выводам Гюйгенса всего на двадцать лет позднее. Поводом, побудившим великого англичанина основательно заняться проблемой, заинтересовавшей его еще в юные годы, были две книги, присланные ему на отзыв Лондонским Королевским обществом в 1674 году...

В 1674 году известный английский артиллерист Р. Андерсон (? — 1696) выпустил в свет капитальный труд «Правильное применение и действие орудий, проверенное как экспериментально, так и математически Р. Андерсоном». Автор проводил в нем мысль, что хотя параболическая теория Галилея расходится с действительностью, ей все-таки можно пользоваться на практике. На два года раньше Андерсона выпустил в свет свою книгу «Геометрические попытки изучения движения маятника и брошенных тел» шотландский математик Дж. Грегори (1638—1675). Считая воздух однородной сопротивляющейся средой, Грегори предположил, что на перемещающуюся в ней материальную точку действует постоянная по величине сила сопротивления, заставляющая тело двигаться равномерно замедленно. Анализ привел шотландца к убеждению, что ядро должно лететь по параболической траектории, ось которой наклонена к горизонту.

Появление книг вызвало споры в Лондонском Королевском обществе, которое направило оба труда на отзыв двум самым компетентным в этой области своим сочленам — Ньютону и Дж. Валлису. Мнения обоих рецензентов совпали: они нашли работу Грегори оригиналь-

ной, но исходящей из неверного представления о законе сопротивления. Параболическая же теория в подаче Андерсона была справедливой хотя бы для случая безвоздушного пространства. Быть может, такое единодушие рецензентов объяснялось отчасти тем, что оба они начали заниматься теоретическим изучением движения материальной точки в сопротивляющейся среде примерно в 1670 году, и их исследования некоторое время проводились почти параллельно, хотя Валлис был чуть впереди: его статья на эту тему вышла на несколько месяцев раньше, чем знаменитые «Математические начала натуральной философии» Ньютона, изданные в 1687 году.

Главные интересы Валлиса (1616—1703) были чисто математические — арифметика и алгебра. В исследовании движения материальной точки в сопротивляющейся среде он видел не более чем изящную математическую задачу, которую почетно было решить, а соответствует это решение действительности или нет, его волновало мало. Вот почему он максимально облегчил себе задачу исследования, приняв простейшее декартово предположение, согласно которому сопротивление воздуха пропорционально первой степени скорости. Исходя из этого предположения, он решил частный случай — вертикальное падение тела под действием сил тяжести и сопротивления воздуха, вывел соотношение между скоростью и временем падения, а также наметил пути решения общего случая — движения точки, выброшенной под углом к горизонту.

Математический гений Ньютона, проявившийся в создании могущественных средств анализа — дифференциального и интегрального исчисления, — намного превосходил способности и возможности Валлиса. Отстав от своего коллеги во времени, сэр Исаак далеко превзошел его в полученных результатах и в широте охвата проблемы. Для него вопрос о сопротивлении был не просто любопытной математической задачей. Ведь если пространство действительно заполнено материей, которая не может не оказывать сопротивления движению планет, то тогда рушилось великое творение Ньютона — вся его система мира, построенная на предположении о пустом космическом пространстве. Вот почему Ньютона на протяжении всей жизни волновала проблема сопротивления, вот почему он неустанно экспериментировал и с затуханием колебаний маятников в воздухе, воде и ртути, и с



Рис. 5. Английский ученый И. Ньютон (1643—1727) — создатель современной динамики

падением шаров в воздухе и воде, и с истечением воды из резервуаров.

Его эксперименты были блестящими для своего времени, но Ньютон считал более важным, чем эксперименты, теоретическое обобщение. Он предположил, что лобовая часть движущегося тела испытывает град ударов со стороны частиц жидкости, непрерывно тормозящий его продвижение вперед. Это означает, что ученый положил в основу механизма сопротивления инерцию тех масс жидкости, которые надо вывести из состояния покоя, чтобы освободить место движущемуся телу. Отсюда ясно: сопротивление должно быть пропорционально числу и массе набегающих на него частиц, то есть должно быть тем больше, чем больше поперечное сечение тела F и плотность ρ жидкости. Что касается скорости, то она, очевидно, будет влиять на сопротивление двояко: при ее увеличении возрастает не только число ударов о тело, но и сила каждого такого удара. Следовательно, можно ожидать, что сопротивление пропорционально квадрату скорости: $R \sim \rho F V^2$.

Таким образом, Ньютон подвел некоторое умозрительное рассуждение, гипотезу под зависимость, смутно улавливаемую еще его предшественниками, и установил: если гидродинамическое сопротивление зависит только от сил инерции, то оно должно быть прямо пропорционально площади поперечного сечения тела, плотности жи-

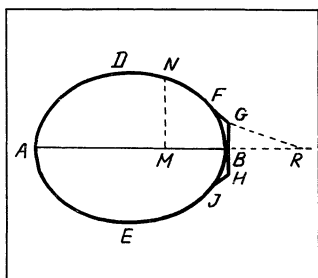


Рис. 6. Эллипсоид вращения с плоской кормовой площадкой—так должно было выглядеть, по мнению Ньютона, тело наименьшего сопротивления, движущееся в воздухе

дкости и квадрату скорости движения. Но вся загвоздка заключалась именно в этом «если», в том, чтобы выяснить, действительно ли в основе механизма сопротивления лежат только силы инерции. И Ньютон нашел способ проверить свое предположение.

Для того чтобы вычислить величину гидродинамического сопротивления в единицах силы — в фунтах или килограммах, — мало знать, чему она пропорциональна. Требуется еще один сомножитель — коэффициент пропорциональности, или сила, действующая на тело тогда, когда все входящие в формулу переменные величины равны единице. Таким образом, для проверки своей гипотезы Ньютон должен был на ее основе вычислить коэффициент пропорциональности для тела простейшей формы и измерить его экспериментально. И здесь Ньютону представились три возможных предположения о строении жидкости: жидкость состоит из упругих частиц, из неупругих частиц, жидкость сплошная. Считая, что поверхность простейшего тела — шара — представляет собой бесконечное множество бесконечно малых плоских пластинок, Ньютон суммировал — интегрировал — действующие на сферическую поверхность силы и теоретически вычислил три возможных значения этого коэффициента для шара. По первой гипотезе оно получилось равным 0,204 кг, по второй — 0,102 и по третьей — 0,025 кг.

Какая же из этих трех гипотез соответствует действительности?

Именно на этот вопрос должны были ответить эксперименты Ньютона с бросанием шаров в соборе св. Павла в Лондоне в 1710 и 1719 годах и его эксперименты с погружением шаров в воду. В результате измерения коэф-

коэффициенты пропорциональности при падении в воздухе получились 0,0265—0,0259 кг, что как будто подтверждало третью гипотезу, согласно которой жидкость следует считать сплошной, а не состоящей из частиц. И хотя опыты самого Ньютона с водой и эксперименты Мариотта дали более высокие значения—первые 0,024—0,037 кг, а вторые 0,036—0,039 кг, инерционная теория гидродинамического сопротивления Ньютона была признана его современниками безусловно подтвердившейся на практике *.

Сейчас, спустя почти 300 лет, мы можем по достоинству оценить вклад Ньютона. Он показал, что гидродинамическое сопротивление иногда можно считать проявлением одних только сил инерции, хотя и не определил четко, в каких именно случаях такое предположение справедливо. Он первым опубликовал и ввел в научный обиход важные закономерности, согласно которым сопротивление пропорционально квадрату скорости, площади поперечного сечения тела и плотности жидкости. Но самым важным его достижением следует считать введение понятия коэффициента пропорциональности, или, как его стали называть, коэффициента сопротивления. Именно в этом коэффициенте оказались скрытыми многие головоломные загадки гидродинамического сопротивления, раскрытие которых и составило существо гидроаэродинамических исследований последующих столетий.

* В 1880 году Д. И. Менделеев привел все данные по бросанию шаров к единообразному виду, чтобы сравнить их между собой. И оказалось, что отклонения от ньютоновых значений в экспериментах XIX века весьма значительны. В опытах Бенценберга и Рейха со свободным падением были получены значения коэффициента пропорциональности соответственно 0,0287—0,07 и 0,026—0,039 кг, а в опытах Менделеева и Лагерхёльма с водой — 0,021 и 0,02—0,045 кг. Свидетельствуя о том, что коэффициент пропорциональности не постоянен, а меняется в зависимости от скорости падения, эти данные могли бы служить убедительным опровержением ньютоновой инерционной теории гидродинамического сопротивления, если бы это не было сделано в середине XVIII века убедительными опытами французских гидравликов.

Глава III. ОБЪЯСНИТЕЛИ НЕНАБЛЮДАЕМОГО И НАБЛЮДАТЕЛИ НЕОБЪЯСНИМОГО

В

В XVIII веке на смену универсальному гению Ньютона явилась, с одной стороны — плеяда блестящих математиков, а с другой — изощренных экспериментаторов. Первые пытались решить сложные задачи гидродинамики, как бы «сверху», путем математической дедукции из нескольких фундаментальных принципов. Вторые стремились в изучении природы обрести новые неведомые теоретикам факты, и «снизу», индукцией, от частных случаев к общим закономерностям, достичь целей, ускользавших от чистых математиков. Среди таких экспериментаторов было немало практических инженеров, работавших на строительстве и обслуживании каналов и других гидротехнических сооружений Европы.

В результате два подхода к проблеме сопротивления, более или менее гармонически совмещавшиеся в творчестве Ньютона, в трудах его преемников надолго расщепили гидродинамические исследования на чисто теоретическое и чисто практическое направления. И направления эти поначалу расходились так сильно, что, казалось, никогда не смогут быть приведены к согласным результатам. Не случайно президент Лондонского Королевского общества С. Хиншелвуд (1897—1967) как-то раз высказал не лишнюю ядовитости мысль о том, что даже в XIX веке «гидродинамики разделялись на инженеров-гидравликов, которые наблюдали то, чего нельзя было объяснить, и математиков, которые объясняли то чего нельзя было наблюдать...»

XVII век и гидравлические школы Европы

В 1933 году в «Очерке развития теории корабля» академик А. Н. Крылов обратил внимание на один любопытный исторический факт. «Сколь это ни странно, —

писал он, — жители гористой Швейцарии Иоганн Бернулли и его ученик Леонард Эйлер первые начали предлагать «новую математику» к решению вопросов, касающихся корабля». Это беглое замечание заслуживает того, чтобы порассуждать о нем поподробнее, ибо действительно складывается впечатление, что интерес ученых той или иной страны к проблемам гидродинамического сопротивления корабля был, если так можно выразиться, прямо пропорционален ее «сухопутности». Другими словами, чем более континентальным было государство, тем больше его ученые интересовались сопротивлением судового корпуса. И в то время как великие морские державы — Португалия, Испания, Нидерланды и Англия — вплоть до конца XVIII столетия практически не интересовались проблемами сопротивления, геометры континентальной Швейцарии монополизировали теоретическую гидродинамику, а представители Франции господствовали в экспериментальных исследованиях...

Два обстоятельства уже в средние века сделали Верхнюю Италию центром гидротехнического строительства в Западной Европе. То были: климат, благоприятный для искусственного орошения, и своеобразный водный режим реки По и ее притоков, берущих начало на снеговых вершинах Альп и Апеннин. Мало кто знает, что эта коротенькая речка, в бассейн которой входило несколько верхнеитальянских государств — Ломбардия, Пьемонт, Эмилия-Романья и Венеция, — по количеству наносов превосходит такие реки, как Дунай и Рона, и даже великий Нил уступает ей в этом отношении. Отложение наносов издревле приводило к тому, что реки бассейна По часто меняли русло, уничтожая города, посевы и дороги на своих берегах. Вот почему обитатели верхнеитальянских государств издавна были вынуждены строить, с одной стороны, охранительные дамбы и плотины для защиты от разрушительных наводнений, а с другой — создавать сеть каналов, шлюзы и водоподъемные машины для орошения полей. В результате многовековой деятельности людей По и ее притоки были окружены плотинами до самого впадения в море, а вся Ломбардская долина оказалась ниже уровня воды в По.

Постройка столь грандиозных систем, начавшаяся еще в XI веке, поощряла накопление и развитие гидравлических познаний, требовала множества искусных гидротехников, и это привело к тому, что итальянская гидрав-

лическая школа заняла главенствующее место в Европе, и в середине XVII века считалось: сказать об ученом, что он гидравлик, значило сказать, что он итальянец.

Но именно в XVII веке итальянские гидравлики начинают быстро сдавать свои позиции, и на первое место выдвигается гидравлическая школа Франции — страны, которая в то время заняла исключительное положение среди других стран Западной Европы. В отличие от Германии, Австро-Венгрии и Италии, раздробленных на многочисленные княжества и королевства, Франция была политически объединена под властью абсолютного монарха. В отличие от Англии, ни одна точка которой не удалена от моря более чем на 150 км, Франция была крупной сухопутной державой и не могла обходиться одним прибрежным судоходством. Вот почему для нее единственным средством транспорта, пригодным для сколько-нибудь значительного грузооборота, было только речное судоходство. Вот почему создание единой внутренней транспортной системы требовало постройки судоходных каналов. И вот почему первый построенный во Франции в 1605—1642 годах канал — Бриарский — был не оросительным, как в Италии, а судоходным: он соединил бассейны Сены и Луары.

В 1666 году некий Рике предложил связать всю внутреннюю и центральную часть страны со Средиземным морем и Атлантическим океаном путем соединения Роны и Гаронны судоходным каналом. Проект был сразу одобрен, и в том же году начались работы по сооружению знаменитого канала дю Миди, а за ним и многих других каналов Франции. Это-то обстоятельство и привело к быстрому развитию французской гидравлической школы, которая в скором времени затмила славу итальянской.

Различие в целях и задачах породило весьма характерное различие в направлениях исследований итальянской и французской гидравлических школ. Если первые стремились, главным образом, к тому, чтобы узнать, как течет вода и как связан расход жидкости с напором, то французские гидравлики сосредоточили свое внимание на другой стороне дела. Поскольку баржи буксировались по каналам лошадьми, то для определения количества «тяговых единиц» требовалось умение заранее рассчитывать усилие, возникающее при буксировке. Поэтому в отличие от итальянских гидравликов французские интере-

совались не только течением жидкостей и измерением расходов, но и сопротивлением, которое жидкость оказывает движущемуся в ней телу.

Любопытно, что Англия, становившаяся великой морской державой, поначалу не проявляла особого интереса к проблемам, волновавшим итальянских и французских гидравликов. И это понятно. Орошением в Англии не занимались, судоходные каналы там начали строить почти столетие спустя, а морские корабли приводились в движение даровой силой ветра. Все это не стимулировало гидравлических исследований.

Что касается России, то Петр I после поездки в Западную Европу понял, какую огромную роль должны сыграть внутренние водные пути в развитии народного хозяйства столь обширной сухопутной державы. По его приказанию в 1711 году был проведен первый в стране судоходный канал — Вышневолоцкий, соединивший приток Волги Тверцу с притоком Волхова Мстой. Тогда же было начато строительство знаменитого Ладожского канала между Волховым и Невой. Эти магистрали должны были соединить водным путем Балтийское и Каспийское моря. И в 1715 году Петр командировал грозного обер-прокурора Г. Скорнякова-Писарева на изыскательские работы по проведению трассы канала, который мог бы соединить Черное и Каспийское моря. В первой половине XVIII века к постройке каналов приступила и Пруссия.

Хотя строили каналы инженеры-практики, Петербургская, Парижская и Берлинская академии наук побуждали и даже обязывали своих профессоров писать теоретические трактаты на важные для практики темы и тем самым сыграли важную роль в становлении теоретической гидродинамики. Все три основоположника этой науки получали прямые задания академий на разработку тех или иных вопросов, связанных с морским делом и гидравликой: француз Ж. Д'Аламбер (1717—1783) — от Парижской, один из «сухопутных швейцарцев» — Даниил Бернулли — от Петербургской, а другой — Леонард Эйлер — от Петербургской и Берлинской.

Даниил Бернулли — представитель знаменитого клана, давшего в трех поколениях из тринадцати представителей мужского пола семь математиков, в полной мере проявил славные научные традиции рода. Кроме чисто математических работ, он много занимался исследовани-

ем задач, которые Парижская академия наук предлагала для решения европейским ученым. За 33 года он получил или разделил с другими учеными десять таких премий: за изобретение песочных часов для мореходов, за трактаты о взаимном наклонении планет, о лучшем способе устройства якорей, о морском приливе и отливе, о лучшем способе определения времени на море, о теории течений и т. д.

Хотя Даниил понимал смысл и красоту математики самой по себе, он всегда подчеркивал, что он не математик. Порой он даже рисовался пренебрежительным отношением к формальному математическому аппарату и нередко ворчал при чтении механических и физических работ, авторы которых злоупотребляли математическими выкладками. Обилие математики в физических трактатах Бернулли считал результатом того, что исследователь не отыскал того ключевого физического или механического начала, принципа, открытие которого резко облегчает задачу и сразу делает ненужными громоздкие математические выкладки. Сам он был мастером в открытии таких начал, и потому математика в его работах очень проста, почти элементарна. Эта особенность ярко проявилась и в самом известном его трактате «Гидродинамика», написанном по прямому заказу Петербургской академии и опубликованном в Лейдене в 1738 году.

В самом деле, если внимательно рассмотреть труды великих естествоиспытателей XVII века, нетрудно убедиться, что это не последовательное, систематическое развертывание следствий и выводов, с математической строгостью вытекающих из исходных аксиом и постулатов, а набор более или менее остроумно поставленных и изящно решенных задач. Причем авторы решений никогда не упускали из виду, что объект их исследований состоит из мельчайших материальных частиц — корпускул, молекул.

Такова и «Гидродинамика» Даниила Бернулли — пестрый набор необычных задач, тонких наблюдений, неожиданных открытий и остроумных рассуждений, зачастую весьма далеко отходящих от темы, обозначенной в заголовке. В этом трактате, с одной стороны, рассматривается движение жидкостей в трубах и каналах, их истечение из отверстий, их колебания в сообщающихся сосудах, изменение формы водной поверхности в ускоренно движущихся и вращающихся резервуарах. А с

другой стороны, в нем приводятся соображения о замерзании льда; мысли о том, каким требованиям должен удовлетворять идеальный газ, что ставит Бернулли у истоков молекулярно-кинетической теории, сформировавшейся лишь в XIX веке; принципы гидрореактивного движения; соображения об идеальных гидравлических машинах. Но, конечно, жемчужина трактата — знаменитый «принцип Бернулли»...

Даниил, верный воззрениям XVII века, видел в корпускулах вещества не просто математические точки. Для него они всегда оставались реальными носителями важных физических свойств — массы, плотности, упругости. И именно такой взгляд на жидкость помог ему приложить к ней так называемую аксиому Гюйгенса, выведенную знаменитым голландцем для совокупности идеально упругих тел. Если любое количество идеально упругих весомых тел, считал Гюйгенс, начинает двигаться произвольно под действием силы своей тяжести, то скорости отдельных тел будут таковы, что сумма их квадратов, умноженных на массы, будет пропорциональна высоте, на которую снизится общий центр тяжести этих тел, умноженной на массы всех тел. Для современного читателя не составит труда понять, что это закон сохранения суммы потенциальной и кинетической энергий системы тел. Таким образом, Бернулли был первым, кто интуитивно применил к течению жидкостей этот фундаментальный закон сохранения.

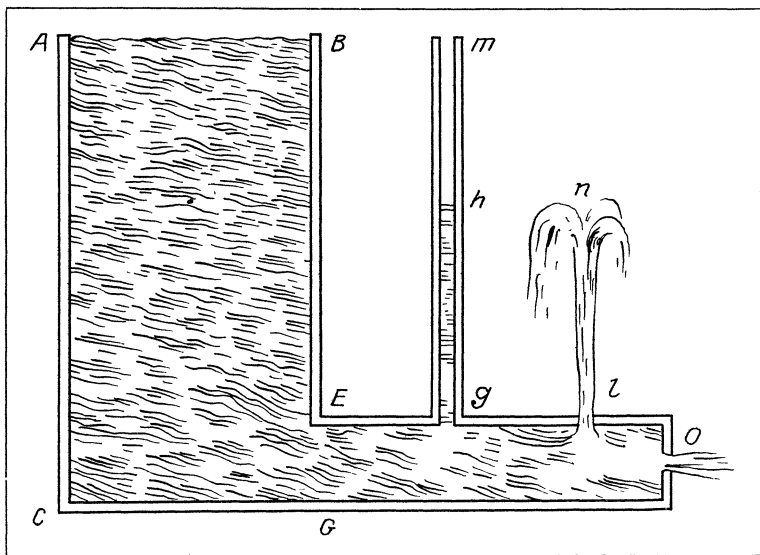
Чтобы понять смысл принципа Бернулли, представьте себе горку замысловатого профиля, по которой без трения один за другим соскальзывают шарики. На спусках скорость предыдущего шарика всегда больше скорости последующего, поэтому расстояние между шариками непрерывно увеличивается, и тем быстрее, чем круче спуск. На горизонтальных участках разрыв между каждой парой шариков перестает возрастать и сохраняется постоянным. Но вот на пути шариков подъем. Теперь картина меняется: шарики, первыми начавшие подъем, теряют скорость быстрее, чем следующие за ними, поэтому расстояние между ними начинает сокращаться, и тем быстрее, чем круче подъем. Но сколь бы причудлив ни был профиль горки, ни один шарик никогда не поднимется выше той высоты, с которой началось движение.

Течение идеальной жидкости в трубе в точности вос-



Рис. 7. Петербургский академик Д. Бернулли (1700—1782)

Рис. 8. Схема из трактата Д. Бернулли «Гидродинамика», иллюстрирующая сформулированный ученым принцип



производит эту картину. Только роль горы причудливо-го профиля как бы выполняет труба переменного сечения. Роль спусков играют сужения, подъемов — расширения. Увеличение разрыва между шариками эквивалентно понижению давления, его сокращение, наоборот, аналогично росту давления. Теперь ясно: в сужениях, где скорость жидкости растет, давление ее падает, а в расширениях, наоборот, растет. Но сколь бы сложным ни был профиль трубы, давление в полностью заторможенном потоке идеальной жидкости в точности равно давлению в источнике.

Даниил гордился этим результатом, и особенно методом его получения. «Я продумал всю теорию, написал трактат и большую часть его в частном порядке сообщил друзьям, а кое-что доложил и на заседаниях Академии раньше, чем поставить какой-либо опыт, — писал он. — Я сделал это для того, чтобы не впасть в ошибку вследствие предвзятости в измерениях из-за предположения неправильного, хотя и удовлетворяющего приблизительно измерениям... После того, как все эти предосторожности были приняты, я, наконец, произвел опыты в присутствии друзей, и эти опыты оказались в таком согласии с моей теорией, что я лично не мог и рассчитывать на него».

«Согласие с опытом»! Вот чем не могли похвастать коллеги Бернулли — выдающиеся математики Эйлер и Д'Аламбер.

Объяснители ненаблюдаемого

Представление о реальном теле как о конгломерате материальных частиц избавляло естествоиспытателей XVII века от опасности впасть в крайности. Они всегда помнили, что физику нельзя свести к геометрии, что физическая задача должна решаться синтетически — набором разнородных средств. Тут может быть и удачное наблюдение, и логическое рассуждение, и математический анализ, и применение какого-нибудь не очень строгого, но плодотворного и дающего хорошее объяснение принципа, и остроумный эксперимент. Благодаря такому уважению к реальности исследования тех времен редко расходились вопиющим образом с действительностью, и большая их часть сохранила достоверность и ценность вплоть до наших дней.

Однако была здесь и обратная сторона: пользоваться столь разнообразными и сугубо индивидуальными методами могли только самые крупные и самобытные исследователи. Их решения могли изумлять и восхищать ученых средней руки, но они не давали им никакой путеводной нити, никакого универсального подхода, никакого метода решения новых проблем. Более того, задачи, придуманные и решенные корифеями XVII века, часто никак не были связаны между собой, поэтому никогда не было уверенности, что охвачено все поле проблем и что от внимания исследователя не ускользнули интересные и важные частные случаи.

В 1730-х годах, изучая труды Ньютона, Эйлер — один из величайших математиков мира — жаловался, что ясно понимал рассуждения и доводы англичанина, пока читал текст, но стоило только чуть-чуть изменить задачи, — и он уже был не в состоянии решить их самостоятельно, ибо не владел тем набором приемов, тем синтетическим методом, которым мастерски распоряжался сэр Исаак. «И вот тогда-то, — пишет Эйлер в предисловии к своей «Механике», — я попытался... выделить анализ из этого синтетического метода и те же предложения... проработать аналитически; благодаря этому я значительно лучше понял суть вопроса. Затем таким же образом я исследовал и другие работы, относящиеся к этой науке, разбросанные по многим местам, и лично для себя изложил их планомерным и однообразным методом и привел в удобный порядок. При этих занятиях я не только встретился с целым рядом вопросов, ранее совершенно не затронутых, которые я удачно разрешил, но я нашел много новых методов, благодаря которым не только механика, но и самый анализ, по-видимому, в значительной степени обогатился».

Именно это сделал Эйлер и именно в этом его великая историческая заслуга! Той теоретической механики, которую мы все привыкли называть ньютоновой, на самом деле в сочинениях Ньютона нет. В своих великих «Математических началах» он пользуется синтетическо-геометрическим методом, и мы напрасно стали бы искать в этом труде привычные нам с институтской скамьи «ньютоновы дифференциальные уравнения движения». Создав основы механики и математического анализа, великий геометр XVII века не соединил их. Эта миссия выпала на долю Эйлера.

Ученик Иоганна Бернулли — отца Даниила — Эйлер получил приглашение Петербургской академии наук в 1727 году, с которого и начинается первый петербургский период в его жизни, длившийся до 1741 года. Затем последовал 25-летний перерыв: политические обстоятельства в России побудили Эйлера принять приглашение прусского короля Фридриха II — того самого, который позднее довоевался до сдачи русским Берлина. Вступив на престол в 1740 году, Фридрих решил преобразовать зачахшее Берлинское общество наук в Прусскую академию, для поднятия престижа которой было решено пригласить крупных ученых.

Переехав в Берлин в 1741 году, Эйлер не порывал связей с Петербургской академией, а в 1766 году он снова вернулся в Россию, где и работал с неослабевающей продуктивностью до самой смерти в 1783 году.

Таким образом, более чем полувековая творческая жизнь Эйлера была связана с Петербургской академией наук, и академик С. И. Вавилов — третий советский президент академии — имел все основания сказать: «Вместе с Петром I и Ломоносовым Эйлер стал добрым гением нашей Академии, определившим ее славу, ее крепость, ее продуктивность». И действительно, содеянное этим человеком поражает своей громадностью и разнообразием. Как выяснилось через много лет после его кончины, список эйлеровых работ включает 886 названий, из которых при его жизни было опубликовано лишь 530. Сам он, смеясь, говорил своим сотрудникам, что академическим изданиям написанных им статей хватит на двадцать лет после его смерти. Он ошибся ровно на 60 лет: последняя его работа была опубликована академией в 1862 году!

И дело не только в количестве. В 1738 году срочно потребовалось произвести трудоемкие, астрономические расчеты для составления карт Российской империи. Группа академиков требовала на их выполнение несколько месяцев. Блестящий вычислитель, Эйлер сделал всю работу за трое суток. Но какой ценой! В результате осложнения после тяжелого нервного переутомления у него вытек правый глаз. А постепенное развитие катаракты на левом глазу привело к тому, что с 1766 года Эйлер практически перестал видеть. Но, как в литературе Гомер, так в математике Эйлер был подлинно «слепец всевидящий»!



Рис 9. Петербургский академик Л. Эйлер (1707—1783) — создатель современной теоретической гидродинамики

В сущности, именно он поставил на твердые теоретические основы науку, название которой — гидродинамика — придумал Даниил Бернулли, а один из основополагающих принципов сформулировал в 1743 году Д'Аламбер...

Простейшими механическими объектами всегда считались неподвижные, находящиеся в равновесии системы, и механика как наука началась именно с изучения таких систем — рычага, наклонной плоскости, блока, винта. Еще основатель статики великий греческий ученый Архимед установил: условие равновесия механической системы состоит в том, что сумма всех действующих на нее внешних сил должна быть равна нулю. Изучая уравнения движения и равновесия точки в эйлеровой записи, Д'Аламбер заметил, что в сущности уравнения движения материальной точки ничем не отличаются от уравнений равновесия, если добавить к действующим на нее внешним силам силы инерции, равные произведению ее массы на ускорения. Исходя из этого сходства, Д'Аламбер и сформулировал знаменитый принцип: все законы, теоремы и уравнения движения системы могут быть получены из законов, теорем и уравнений равновесия простым добавлением сил инерции к внешним силам, действующим на систему.

Благодаря принципу Д'Аламбера весь хорошо разработанный аппарат математического исследования статических систем оказался приложим к движущимся системам, поэтому не случайно говорят иногда, что именно с Д'Аламбера начинается история развития динамики систем.

В 1750 году Эйлер выпустил в свет свой первый гидродинамический трактат «Открытие нового принципа механики». За ним в 1753 году появляются классические «Общие принципы состояния равновесия жидкостей». В 1755 году — знаменательном для теоретической гидродинамики — Эйлер публикует «Общие принципы движения жидкостей» и «Продолжение исследований по теории движения жидкостей», а в следующем году — «Разъяснения относительно сопротивления жидкостей».

В этих трактатах впервые появляются «ньютоновские уравнения движения» в современном виде. В них сделан самый важный шаг, отличающий механику XVII века от механики XVIII — окончательно отброшены корпускулярные представления и физические тела рассматриваются как континуум, то есть нечто непрерывное, сплошное. Такое представление позволило установить систему гидродинамических переменных, без которых развитие этой науки было бы невозможным. В трактатах, наконец, появляются общие уравнения движения идеальной жидкости, вошедшие во все современные курсы механики.

Эйлер понимал, что всеобщность предложенных им уравнений, ведущая к весьма громоздким вычислениям, может порой затемнить суть дела. Поэтому, желая показать прикладное, практическое значение своей работы, он рассмотрел ряд частных случаев, важных для практики, и попытался проинтегрировать свои уравнения, получив несколько важных результатов. Так, Ньютон, положивший в основу своей теории инерцию сталкивающихся с движущимся телом частиц жидкости, полагал, что гидродинамическое сопротивление полностью определяется формой носовой оконечности тела и совершенно не зависит от обводов кормы. И это как будто подтверждалось тем, что шар и полушар испытывали почти одинаковое сопротивление.

Эйлер был первым, кто усомнился в этом, теоретически доказав, какое огромное влияние может оказывать форма кормовой оконечности тела на испытываемое

мое им сопротивление. Он также теоретически предсказал принципиальную возможность разрыва сплошности жидкости и возникновение явления, известного ныне как кавитация. Однако все эти важные открытия были выражены в такой сложной математической форме, что мало кто обратил на них внимание, и они были основательно забыты на целое столетие. Но не была забыта самая большая неудача созданной Эйлером теоретической гидродинамики...

В берлинский период своей жизни (1741—1766) Эйлер не раз получал прямые задания от Фридриха II на проведение тех или иных научных работ. Так, по желанию короля он консультировал строительство гавель-одерского канала и сооружение системы водоснабжения королевского дворца в Сан-Суси, исследовал устройство водяных и ветряных мельниц, усовершенствовал ряд оптических приборов, в частности волшебный фонарь. По прямому же указанию Фридриха он в 1745 году взялся перевести с английского на немецкий язык книгу Б. Робинса «Новые принципы артиллерии».

Можно полагать, что эта работа доставила Эйлеру особое удовольствие. Во-первых, вопросы баллистики интересовали его с 1727 года, когда он участвовал в опытах Д. Бернулли по изучению движения ядра, выстреленного вертикально вверх. А во-вторых, с Б. Робинсом у него были особые счеты...

Когда в 1736 году вышел в свет фундаментальный труд Эйлера «Механика, или наука о движении, изложенная аналитически», ученый мир Европы не преминул откликнуться на это событие. В лейпцигских «Новых актах эрудиторов» была помещена на эту книгу панегирическая рецензия анонимного автора. Французы вели себя сдержаннее: в «Мемуар де Трево» была опубликована благожелательная рецензия, в которой, однако, высказывалось опасение, что если принятое Эйлером направление восторжествует, то геометрия может погубить физику. Самым горячим нападкам труд Эйлера подвергся в Англии со стороны известного математика и механика Б. Робинса (1707 — 1751). Выходец из бедной квакерской семьи, Робинс самостоятельно овладел началами математики и опубликовал несколько работ, принесших ему известность. После этого он занялся фортификацией и артиллерией, первым применил ротативную машину для изучения сопротивления ядер и

изобрел баллистический маятник. В 1749 году, получив должность генерал-инженера Ост-индской компании, он возглавил было постройку крепостных сооружений Мадраса, но заболел лихорадкой и умер, так и не начав работ.

Заядлый ньютонианец, Робинс был горячим поклонником геометрических методов в математике и потому с негодованием отнесся к аналитическим формулам, к которым свел все изложение механики Эйлер. Острый пронизательный критик Робинс не упустил ни одной ошибки в трактате Эйлера, справедливо указывал, что Эйлер слишком увлекается вычислениями и не уделяет достаточного внимания физическим соотношениям, что он неосторожно пользуется бесконечно малыми и бесконечно большими величинами, что применение геометрических методов в ряде случаев дало бы значительное упрощение по сравнению с аналитическими. Но, увы, эти недочеты эйлеровой работы Робинс приписывает исключительно «той нечеткости представлений, к какой дифференциальное исчисление склоняет своих сторонников», не заметив могущества новых методов и богатства полученных с их помощью результатов.

Когда Эйлер взялся за перевод на немецкий язык книги своего британского оппонента-артиллериста, он был уже далеко не новичком в баллистике. И эта работа предоставила ему прекрасный случай дать теоретические комментарии к блестящим баллистическим экспериментам Робинса, опубликованным в 1742 году в книге «Новые принципы артиллерии». Эйлер не только перевел книгу, но и снабдил ее многочисленными и ценными комментариями, повысившими значение труда Робинса.

В самом деле, хотя ротативную машину и баллистический маятник для измерения скорости пуль и ядер изобрел Робинс, но полная теория этого устройства, формула для строгого определения дульной скорости и метод учета действия сопротивления воздуха на маятник принадлежат Эйлеру. Хотя идею о том, что быстрый рост сопротивления с увеличением скорости объясняется возникновением позади тела разрежения, куда не успевает подтекать воздух, первым высказал Робинс, но именно Эйлер придал ей строгую математическую форму, необходимую для анализа. Хотя графическую зависимость сопротивления ядра от скорости по-

лета первым построил на базе опытов именно Робинс, подобрал под этот график аналитическую двучленную формулу и предугадал огромное влияние скорости звука на сопротивление снаряда Эйлер.

Но в теоретических дополнениях Эйлера к трактату Робинса был один результат, перечеркнувший значение теории для практиков: попытавшись математически рассчитать сопротивление шара, движущегося в идеальной несжимаемой жидкости, Эйлер получил удивительный результат — сопротивление равно нулю! Шар в идеальной жидкости движется так, как будто ее нет вообще, как будто он летит в пустоте!

Такая же неудача семь лет спустя постигла Д'Аламбера, когда он попытался с помощью своего принципа вычислить силу сопротивления тела овальной формы, движущегося в идеальной жидкости. Просуммировав путем головоломных ухищрений давления на все части тела, он с изумлением убедился, что общее сопротивление равно нулю! Не в силах дать разумное объяснение этому результату, он обескураженно писал, что нулевое сопротивление — «единственный парадокс, который он оставляет для разрешения геометрам будущих времен». И нужно сказать прямо: парадокс Д'Аламбера — Эйлера доставил теоретикам много хлопот.

Что же касается инженеров-гидравликов, то они не обращали на теоретические парадоксы никакого внимания. Теоретическая гидродинамика пошла своим путем, становясь все более элегантной математической дисциплиной, а гидравлика — своим, становясь все более важным и полезным практическим искусством. Д'Аламберу лично довелось участвовать в экспериментах, показавших, как далеко разошлись теория и практика не в одной только баллистике.

Наблюдатели необъяснимого

Если вдуматься в смысл исследований, проводимых в середине XVIII века в области гидродинамического сопротивления, нетрудно заметить, что все они ищут подтверждения одной мысли, идеи. И эта идея принадлежала величайшему научному авторитету — Ньютону.

Замечательные результаты, достигнутые с помощью математического анализа, укрепили его в мысли, что

можно строго математически рассчитать форму тела с наименьшим гидродинамическим сопротивлением. Ньютон сам пытался решить эту задачу и нашел, что артиллерийский снаряд наименьшего сопротивления должен быть эллипсоидом вращения, вытянутым вдоль направления полета, с плоской площадкой в хвостовой части. «Я убежден, — писал Ньютон в своих «Математических началах натуральной философии», — что этот принцип может оказаться полезным и в постройке кораблей».

После того как попытки Эйлера и Д'Аламбера вычислить сопротивление шара и эллипсоида в идеальной жидкости привели к «нулевому парадоксу», исследователи обратились к экспериментам на моделях. «Можно проводить очень важные для изучения сопротивления эксперименты с помощью моделей, в точности подобных натурным судам, — писал Эйлер. — Эти эксперименты тем более необходимы, что теория этого вопроса весьма несовершенна». Из каких же соображений исходили при этом ученые?

Они хотели опытным путем добиться успеха там, где оказалась бессильной математика. Им казалось, что модели помогут найти наивыгоднейшую форму корпуса без вычисления сопротивления. Скажем, можно прогнать в воде несколько моделей разных форм с разными скоростями, и тогда обязательно обнаружится среди них такая, у которой сопротивление окажется наименьшим. По этой форме маленькой модели и надо строить потом большие корабли. Пусть заранее нельзя сказать, какую именно силу следует приложить к судну для получения нужной скорости. Достаточно уверенности в том, что его сопротивление будет меньше, чем у корпусов всех других форм. Именно таким путем пытался решить поставленную Ньютоном задачу его современник и соотечественник С. Фортрей (1622—1681), об опытах и результатах которого, к сожалению, не сохранилось подробностей.

Примерно столетие спустя, в 1770-х годах, к систематическим испытаниям моделей приступил Ф. Чапман. Сын англичанина, находившегося на шведской службе, Чапман в юности много путешествовал, знакомясь с верфями Англии, Франции и Голландии, собирая чертежи и всевозможные сведения о кораблях. В Англии ему даже пришлось отсидеть месяц в тюрьме за не вполне

законное добывание таких документов*. В 1772 году Чапман стал главным кораблестроителем шведского флота, а в 1783 году — контр-адмиралом.

Чапман был одним из первых, кто стал применять математические методы в практическом кораблестроении. Разработав весьма сложный геометрический способ расчета сопротивления корпуса по чертежам корабля, он решил проверить свою теорию на опыте и провел серию систематических испытаний на глубоком пруду неподалеку от Карлсруны. В ходе этих испытаний Чапман установил, что для уменьшения сопротивления модели надо по мере увеличения скорости смещать наибольшее поперечное сечение ближе к носу.

В 1775 году, когда опыты Чапмана были в самом разгаре, вновь назначенный министр финансов Франции А. Тюрго поручил своему давнишнему знакомому Д'Аламберу очень важное дело. Задумав модернизировать внутренние судоходные пути страны, министр ре-

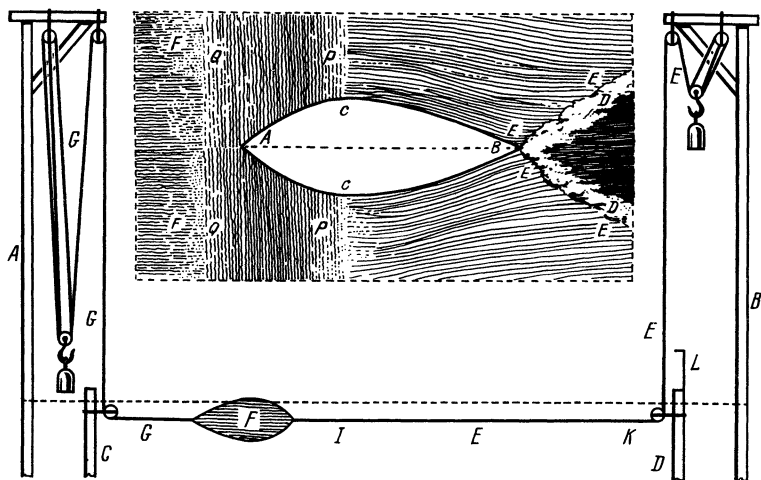


Рис. 10. Так выглядела одна из первых в истории установок для испытания сопротивления моделей, сооруженная шведским исследователем Ф. Чапманом (1721,—1808)

* Альбом не всегда официально полученных чертежей под названием «Архитектура Навалис Меркатория» Чапман издал в 1775 году. Почти двести лет спустя, в 1957 году, этот альбом был переиздан в ГДР и стал бесценным пособием для современных судомоделлистов.

шил начать это грандиозное предприятие с научного исследования проблемы. А в ней центральным вопросом было сопротивление, испытываемое баржей при буксировке в канале.

Зная, что теория бессильна в вычислении сопротивления даже тел простейших геометрических форм, Д'Аламбер сделал ставку на модельные испытания. К выполнению намеченной программы модельных испытаний он привлек маркиза Ж. Кондорсе (1743—1794) и аббата Ш. Боссю.

Первый из них проявил незаурядные математические способности в шестнадцатилетнем возрасте во время обучения в иезуитском колледже, и уже тогда Д'Аламбер сулил ему блестящую будущность. Действительно, математические и философские трактаты Кондорсе со временем открыли перед ним двери и Парижской академии наук и Французской академии. Во время Великой Французской революции он примкнул к партии жирондистов, казнившей Людовика XVI, а позднее сам был арестован и покончил с собой в тюрьме.

Что же касается Боссю, то это был педантичный экспериментатор и отличный математик. Его работы несколько раз удостоивались премий, которые он разделил с Д. Бернулли и Эйлером. Член Парижской академии наук, он с 1752 года почти до самой революции был бессменным профессором математики в инженерной школе в Мезьере. В годы революции Боссю потерял все свои чины и звания, состояние и даже аббатскую обитель, но при Наполеоне стал членом Института Франции и экзаменатором Политехнической школы. Главное дело жизни Боссю — создание учебных курсов по математике и гидромеханике и воспитание многочисленных инженеров. В истории же гидродинамики его имя сохранилось главным образом в связи с проведением испытаний по заданию Тюрго.

Эксперименты проводились на территории инженерной школы на искусственном пруду длиной 30 м и шириной 16 м, максимальная глубина достигала 2 м. На боковых стенках пруда были установлены полутораметровые отметки: у каждой из них во время опытов стояли наблюдатели и по отсчитываемым вслух полусекундам отмечали время прохождения модели через отметку. На берегу пруда возвели 23-метровую деревянную мачту: падавший с нее тяжелый груз через систе-

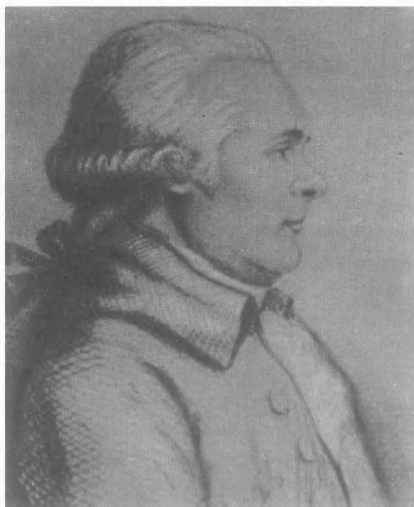
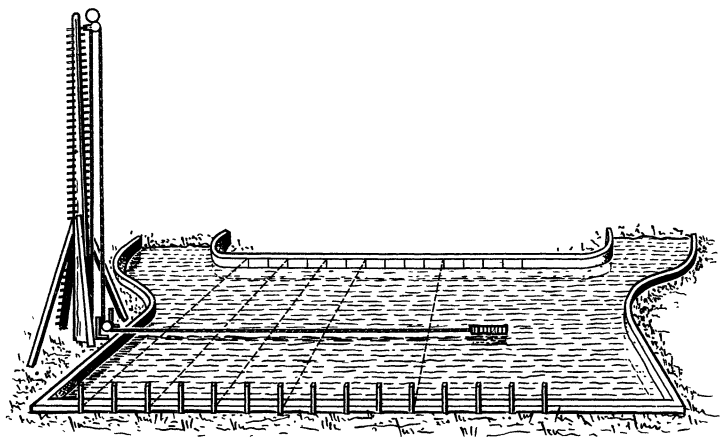


Рис. 11. Французский академик Ш. Боссю (1730—1814), проводший обширные модельные испытания

Рис. 12. Схема бассейна Боссю в Мезьере



му блоков приводил в движение испытываемые модели, плывшие по поверхности воды вдоль направляющего троса.

Всего было испытано двадцать моделей: составленные из простейших геометрических тел — параллелепипедов, призм и цилиндров, они имели примерную форму корабельного корпуса. Многие модели при буксировке испытывали сильные поперечные колебания. Для их устранения модели пришлось снабдить рулями

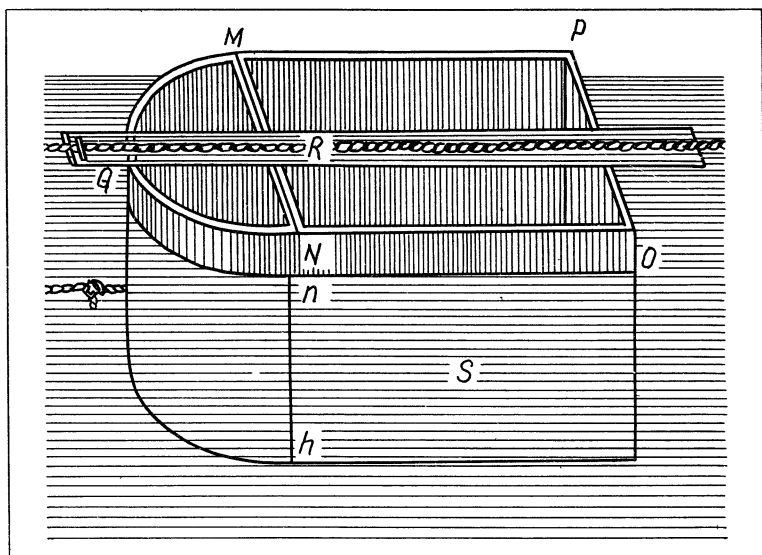


Рис. 13. Одна из моделей, испытанных Боссю

довольно большой площади. Кроме выявления зависимости гидродинамического сопротивления моделей от их формы и скорости буксировки, академикам было поручено выяснить, влияет ли на величину сопротивления модели стесненность водного пространства. Для этого Боссю придумал некое подобие канала — на дно пруда ставили вертикальную раму, на верхней части которой закрепляли деревянные стенки и днище. Переставляя эти элементы, можно было регулировать сечение желоба, по которому буксировалась модель.

Как видим, эксперименты в Мезьере носили чисто прикладной характер и должны были ответить только на самые настоятельные запросы практики. Главным из них было выявление зависимости между сопротивлением судна и сечением канала, в котором оно буксируется. Эксперименты Боссю и Кондорсе показали: чем меньше сечение канала, тем больше испытываемое корпусом судна сопротивление. После установления этого факта идея подземных каналов, выдвигаемая тогда некоторыми изобретателями, отпала.

Хотя в решении главной задачи — в отыскании фор-

мы наименьшего сопротивления — парижские академики не преуспели, они получили гораздо более обширный экспериментальный материал, чем тот, которым располагал Ньютон, когда создавал свою инерционную теорию гидродинамического сопротивления. Анализ этого материала отчасти подтверждал выводы Ньютона, а отчасти противоречил им. Так, великий англичанин считал, что гидродинамическое сопротивление практически не зависит от трения между жидкостью и стенками движущегося тела и полностью определяется инерцией перемещаемых слоев жидкости. Не смогли обнаружить влияния трения и парижские академики. «Это трение очень мало и не может быть выделено из трения в блоках и из воздушного сопротивления», — писал Боссю.

Подтвердилось и другое мнение Ньютона, который чувствовал, как сильно может влиять свободная поверхность жидкости на величину гидродинамического сопротивления движущегося вблизи нее тела, и всегда оговаривался, что ограничивает свое рассмотрение только случаями движения тел глубоко под водой. Парижские академики, экспериментировавшие с моделями надводных судов, уделили серьезное внимание этой стороне дела и на опыте доказали основательность подозрений Ньютона: сопротивление моделей, буксируемых на поверхности воды, возрастало не пропорционально квадрату скорости. Секрет этого расхождения не остался загадкой для Боссю: увеличение сопротивления вызывалось создаваемыми на поверхности волнами.

Однако наиболее важным для становления гидродинамики результатом академиков было экспериментальное подтверждение вывода, теоретически предсказанного Эйлером: сопротивление буксируемых моделей сильнейшим образом зависит от формы кормовой оконечности. Чем резче обрыв, тем больше сопротивление, и наоборот, закругленная или плавно сходящая на нет кормовая оконечность способствует снижению сопротивления.

Этот вывод, вопиюще противоречивший утверждению ньютоновой теории сопротивления, вызвал повышенный интерес к фундаментальному исследованию академиков. Пошли споры о причинах такого расхождения. Не заключались ли эти причины в том, что модели испытывались на поверхности воды, против чего предостерегал Ньютон? Или все дело в том, что сами мо-

дели были слишком замысловатой формы и не являлись простейшими геометрическими телами? Эти споры и этот интерес к проблемам сопротивления заставили ученых и инженеров взяться за изучение более ранних экспериментов, проведенных двумя выдающимися французскими исследователями.

Первым из них был уже знакомый нам Мариотт. В его классическом «Трактате о движении воды и других жидкостей», опубликованном в 1686 году, через два года после смерти автора, немало места уделено традиционным проблемам гидравлики, но наряду с ними есть глава, подобной которой не встречается в трудах его современников и предшественников.

Сконструировав рычажный динамометр с круглой плоской пластиной, укрепленной на конце рычага, Мариотт направлял на нее перпендикулярно струи воды, истекающей через сечения различных площадей под разными напорами. Полученные им результаты были первыми в истории достоверными измерениями сил взаимодействия между твердым телом и потоком жидкости

Так, именно Мариотт первым установил на опыте, что струи одинаковой скорости, но разного поперечного сечения, падая перпендикулярно на плоскую пластину, создают силы, уравниваемые грузами, величины которых пропорциональны квадратам диаметров струй. В серии других опытов был получен другой важный результат: струи при разных скоростях и прочих равных условиях создают на перпендикулярной пластине силы, прямо пропорциональные квадратам их скоростей или высотам уровней воды в резервуарах, из которых они истекают.

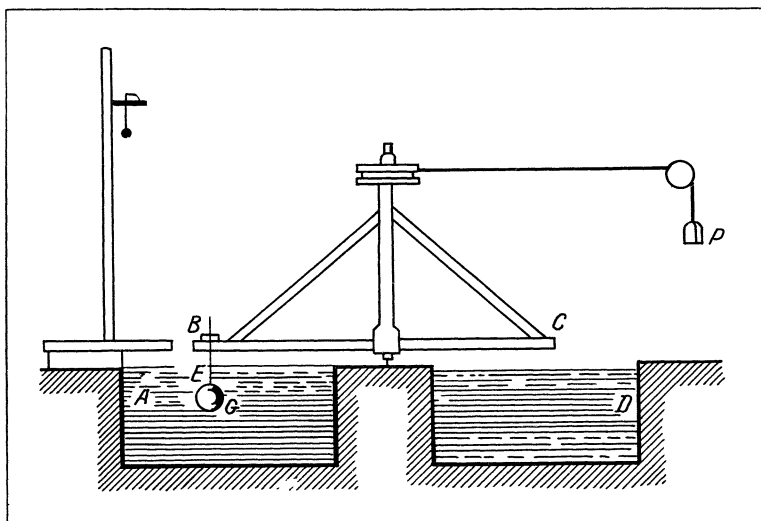
Мариотт не ограничился этими исследованиями в изучении сопротивления тел, движущихся в жидкостях. Он изучал также удар воздушных струй о препятствия; исследовал силы, действующие со стороны движущейся воды на пластину, установленную перпендикулярно к направлению движения потока. Основываясь на этих экспериментах, Мариотт пытался даже оценить силы, оказываемые ветром на деревья (как потом выяснилось — задача необычайной сложности), а также на наклонные лопасти мельничных крыльев и водяных колес.

Вторым выдающимся исследователем-эксперимента-



Рис. 14. Французский ученый Ж. Борда (1733—1799), проводивший измерение сопротивления тел простейших геометрических форм

Рис. 15. Схема горизонтальной ротативной машины, с помощью которой Борда провел свои исследования



тором был Ж. Борда — типичный представитель французских инженеров-ученых XVIII века. За исследование по баллистике он был избран в члены Парижской академии наук уже в 23 года. В 1767 году, поступив на флот, Борда занимался навигацией, астрономией, картографией и гидравликой, позднее в качестве командира корабля участвовал в войне в Америке, а в 1782 году попал в плен к англичанам и был выпущен под честное слово. В годы революции был одним из инициаторов разработки метрической системы мер (в частности, именно Борда придумал слово «метр») и участником плана измерения длины дуги парижского меридиана.

В двух мемуарах, опубликованных в 1763 и 1767 годах, Борда изложил результаты своих обширных опытов, предпринятых для проверки ньютоновой теории сопротивления. Эти эксперименты он начал в Дюнкерке в 1756—1757 годах. В первом мемуаре описаны опыты по исследованию воздушного сопротивления на простейшей ротативной машине — равноплечем рычаге, приводимом во вращение вокруг горизонтальной оси падающим грузом. К концам рычага прикреплялись испытываемые тела, и как только скорость вращения становилась постоянной, производилось измерение сопротивления. В этом же мемуаре описан опыт с кубом, буксируемым прямолинейно в воде с помощью груза. Во втором мемуаре Борда описывает эксперименты с буксировкой различных тел в воде с помощью горизонтальной ротативной машины. На этом сравнительно простом и недорогом оборудовании Борда в отличие от всех своих предшественников впервые испытал не только шары и пластины, но и множество тел иных форм — призмы, цилиндры, конусы и клинья.

Борда принадлежит честь открытия многих важных фактов, касающихся сопротивления жидкостей. Именно он первым экспериментально подтвердил, что сопротивление полностью погруженного тела пропорционально квадрату скорости, а сопротивление тела, погруженного лишь частично, растет пропорционально более высоким степеням скорости, ибо они при движении генерируют на поверхности жидкости систему волн.

Но некоторые из выводов Борда оказались ошибочными. Он, например, считал, что сопротивление воздуха не пропорционально площади поперечного сечения —

заблуждение, окончательно показанное опытами французского артиллериста И. Дидиона в 1840-х годах. Борда вопреки Эйлеру и парижским академикам утверждал, что поскольку сопротивления шара и полушара, движущегося выпуклой стороной вперед, почти равны, то сопротивление тела определяется только формой его носовой части, в то время как кормовая оконечность на сопротивление практически не влияет. Заметим, что разгадка этого заблуждения задержалась до начала XX столетия, когда, наконец, Л. Прандтль разъяснил, в чем дело. Но если это последнее заблуждение Борда дало некоторую поддержку инерционной теории сопротивления Ньютона, то все остальные его открытия прямо ее опровергали.

Так, Борда установил, что сопротивление квадратной пластины, движущейся в воздухе, на 60% больше, чем следует из ньютоновой теории; что отношение сопротивления шара к сопротивлению плоского диска такого же диаметра не соответствует ни одной из ньютоновых гипотез; что сопротивление конических тел и клиньев пропорционально скорее синусам в первой степени, чем их квадратам, как получалось у Ньютона...

Хотя Борда не попытался сам найти какие-либо связи между своими наблюдениями, он очень ясно показал все случаи несоответствия ньютоновой теории эксперименту. И некоторые историки полагают, что обширные опыты Д'Аламбера, Боссю и Кондорсе были как бы ответами на вопросы, поставленные Борда. Убедительность этих ответов была, по-видимому, недостаточна высока, ибо, внимательно ознакомившись с отчетом академиков и с трудами самого Боссю и не найдя в них нужных сведений, один французский военный инженер, занимавшийся проектированием и постройкой гидротехнических сооружений, решил самостоятельно произвести все необходимые ему эксперименты. Этим инженером был П. Дюбуа.

Отпрыск старинного нормандского рода, Дюбуа учился в Париже и стал инженером-строителем, не достигнув еще 20 лет. В 1761 году, будучи военным инженером, он по заказам правительства проводит обширные гидравлические исследования. В 1787 году после смерти старшего брата он наследует титул графа, вследствие чего в разгар террора в 1793 году ему,

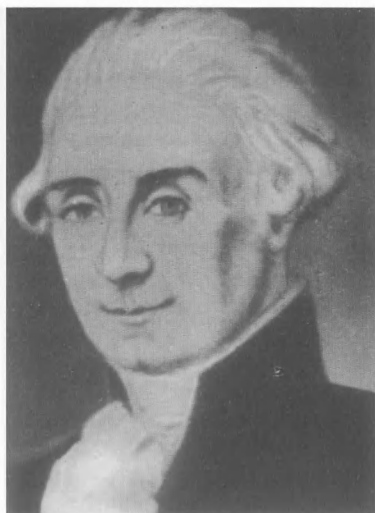
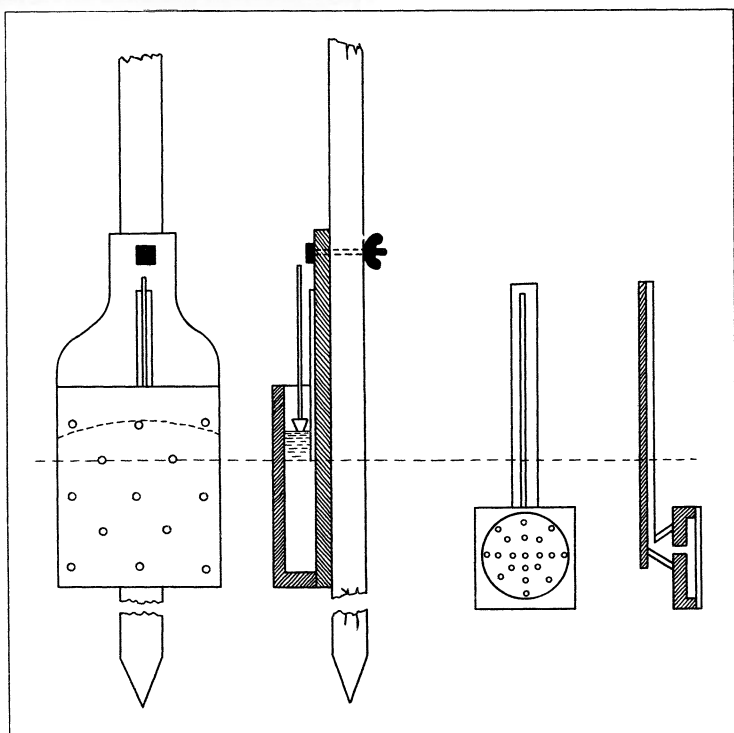


Рис. 16. Французский военный инженер П. Дюбуа (1734—1809), открывший феномен «сопротивления давления» или «сопротивления формы»

Рис. 17 Приборы, с помощью которых Дюбуа сделал свои открытия



обремененному огромной семьей с одиннадцатью детьми, приходится бежать из Франции. Он возвратился лишь в 1802 году при Наполеоне и до самой смерти занимался подготовкой к печати третьего издания своего классического трехтомного труда «Принципы гидравлики». Первые два издания вышли в 1779 и 1786 годах, второе из них было переведено на немецкий и английский языки и в свое время привело в восторг первого американского президента Г. Вашингтона. Третье издание вышло в 1816 году уже после смерти автора.

В отличие от Борда и академиков, которые вскрыли несоответствие ньютоновой теории опыту, но не предложили ничего взамен, Дюбуа был одним из первых, кто попытался опытным путем установить новые начала в учении о сопротивлении. «Последняя часть сочинения, — писал он в предисловии к «Принципам гидравлики», — содержит наш опыт о сопротивлении жидкостей: здесь совершенно новым способом мы рассматриваем... сопротивление воды и воздуха, не пользуясь вовсе прежней теорией, которая оказалась столько раз противоречащею опыту, и стараясь отыскать в опытах, до нас не имевшихся, новые точки зрения на предмет».

Великая заслуга Дюбуа состояла в том, что он первым попытался перекинуть мост между теоретической гидродинамикой и практическим судостроением. В свое время, размышляя над загадками гидродинамического сопротивления, Л. Эйлер высказал мысль, что если просуммировать давления всех обтекающих тело струй, то можно получить величину силы сопротивления, которая так интересует практиков. Но привязать эту теоретическую идею к расчету конкретных корпусов Эйлеру так и не удалось. Берясь за эту задачу, Дюбуа с гениальной изобретательностью воспользовался простым и полезным прибором, предложенным его соотечественником А. Пито.

Имя этого человека ныне известно любому инженеру по прибору «трубка Пито», но мало кто знает хоть что-нибудь о нем. А. Пито (1695—1771) — уроженец юго-западной Франции. По достижении двадцатилетнего возраста он учился математике и физике у самого Реомюра и в 1740 году получил весьма высокий пост: был назначен суперинтендантом знаменитого канала дю

Миди. Пито за свою жизнь осушил немало болот, построил много мостов, акведуков и дамб; написал несколько мемуаров по строительному делу, геодезии, астрономии, математике и гидротехнике; стал членом Лондонского Королевского общества и Парижской академии наук. Но бессмертие ему принес прибор — трубка, загнутая под прямым углом. В такой трубке, погруженной в воду загнутым концом против потока, поднимался столбик жидкости, по высоте которого нетрудно было вычислить скорость потока в данной точке.

Сообразив, что препятствовать движению тела вперед может не только избыток давления перед носом, но и недостаток его за кормой, Дюбуа задался целью прямо измерить давление на передней и задней стенках движущегося тела. Для этого он сконструировал плоскую коробку с множеством отверстий, которые можно было затыкать, оставляя одно или несколько из них открытыми. Попадая под напором внутрь коробки, жидкость поднималась по приделанной к задней стенке трубке тем выше, чем больше был скоростной напор в той точке, где находилось открытое отверстие. Установив такую стенку поперек потока, Дюбуа сразу же сделал важное наблюдение: скоростной напор максимален в центре пластины и постепенно убывает к ее краям. Открывая же сразу все отверстия, Дюбуа получал величину среднего давления на всю поверхность стенки.

Устанавливая такую коробку поперек потока отверстиями вперед, исследователь оценивал величину скоростного напора на носовую часть тела. Повернув же коробку на 180° отверстиями назад, Дюбуа убедительно доказал: за плоской стенкой в потоке создается разрежение, или как он его назвал, «недавление». Складывая напор на переднюю стенку и «недавление» на заднюю, нетрудно было получить величину сопротивления, испытываемого движущимся в жидкости телом.

Но Дюбуа не ограничился установлением только одного этого факта. Он стал помещать прибор на противоположащих гранях куба и призм различной длины и убедился, что давление на лобовую стенку при этом не меняется, а «недавление» на заднюю стенку становится тем меньше, чем длиннее призма. Причина этого важного для практики эффекта не ускользнула от Дюбуа: чем длиннее тело, тем большее количество воды оно увлекает за собой вследствие трения, поэтому в кормовой

части разность скоростей тела и прилежащих к нему водяных струй становится меньше, а потому уменьшается и «недавление».

Таким образом, Дюбуа первым объяснил физический механизм гидродинамического сопротивления сравнительно коротких и плохо обтекаемых тел и пластин, поставленных поперек потока, и ввел в научный обиход термин «сопротивление формы», которое погом называли иногда сопротивлением давления. Он же показал, что для тел большой длины пренебрегать трением нельзя. Но, разделив гидродинамическое сопротивление на сопротивление формы и сопротивление трения, Дюбуа не смог дать надежных количественных соотношений, которые позволяли бы вычислять сопротивление судов. Эта работа выпала на долю более поздних исследователей.

Запоздалые лавры англичан

Англия задержалась с постройкой каналов, ибо долгое время могла обходиться каботажным плаванием да использованием приливов в устьях рек. Вот почему в то время как Франция, Германия, Россия лихорадочно сооружали грандиозные системы внутреннего судоходства, Англия ограничилась постройкой всего одного канала между реками Эйри и Калдер. Положение изменилось после того, как в 1772 году в строй вступил канал, построенный герцогом Бриджуотерским для доставки угля из его уорслейских шахт в Манчестер. Для осуществления своих планов герцог нашел блестящего исполнителя в лице Дж. Бриндли (1716—1772) — выдающегося инженера-самородка, заложившего основы английской системы внутреннего судоходства. Появившись гораздо позднее французской, российской и немецкой, английская система судоходных каналов отличалась от них рядом интересных особенностей. Если в континентальных странах по каналам транспортировались главным образом сравнительно дешевые сельскохозяйственные грузы и сырье, то в Англии по ним впервые стали перевозить дорогостоящую промышленную продукцию и даже пассажиров. Начало таким перевозкам положил сам герцог Бриджуотерский, наладивший на своем канале поездки пассажиров на крытых барках, буксируемых лошадьми. Позднее пассажирское сооб-

щение по каналам было введено между Эдинбургом и Глазго, Лондоном и Бирмингемом и между городами Ирландии, где из-за плохого состояния сухопутных дорог пассажирское движение по каналам развилось сильнее, чем в самой Англии.

Грандиозный финансовый успех первых каналов пробудил предпринимательские аппетиты. Аристократы-землевладельцы, помещики-сквайры, купцы, предприниматели и даже университеты спешили вложить деньги в постройку новых прибыльных сооружений. Англию охватывает настоящий ажиотаж, достигший кульминации, прямо-таки «каналомании», в 1791—1797 годах. И случилось так, что именно в это время в Англии находился американский художник-портретист Р. Фултон (1765—1815). Картина лихорадочного строительства каналов захватила молодого провинциала. Оставив живопись, он изобретает механический цепной экскаватор для рытья каналов, разрабатывает движитель типа «рыбий хвост» для барок, придумывает механические скаты и вертикальные подъемники для судов, размышляет об установке паровой машины на корабле. Свои взгляды о революционизирующем действии каналов на жизнь народов он излагает в изданном в 1796 году «Трактате о судоходных каналах» с собственными иллюстрациями. Пропаганда завладевших воображением Фултона идей привела его во Францию, где американский посол в Париже Р. Ливингстон предложил ему вплотную заняться паровым судоходством.

Именно в Париже, соорудив испытательный бассейн длиной около 20 м, Фултон провел долгие и кропотливые эксперименты, исследуя на моделях эффективность весел, плавников, цепей с гребками, водяных колес и винтов. В результате огромной исследовательской работы ему удалось сделать то, чего не смогли предшественники: найти способ увязки корпуса, машины и гребных колес. В 1803 году первая экспериментальная паровая лодка Фултона развила скорость 4,8 км/ч, двигаясь против течения Сены...

Позднее Фултон узнал, что в 1791 году, как раз тогда, когда он размышлял о возможности применения паровой тяги на каналах, в Лондоне произошло событие, не менее важное для создания парохода, чем изобретение общественно паровой машины. В этом году возникло Общество по усовершенствованию корабельной

архитектуры. Оно объявило премию и золотую медаль за лучшее экспериментальное исследование законов сопротивления жидкости, которые привлекли к себе внимание Бофуа.

Сын лондонского пивовара, М. Бофуа уже в четырнадцатилетнем возрасте решил, что пивоварение занятие не для него, и вместо того чтобы учиться отцовскому ремеслу, занялся науками. Огромные чаны охладителей на отцовской фабрике он приспособил для проведения гидродинамических опытов — измерял время, затрачиваемое на движение в воде различных геометрических тел, прикрепленных к качающемуся маятнику. Испытав 94 таких тела, он счел себя достаточно подготовленным к участию в конкурсе Общества. Работы, проведенные им для этого конкурса, поражают своей громадностью и длительностью: он занимался ими семь лет — с 1791 по 1798. Собранные вместе, отчеты по этим испытаниям составили огромный труд «Морские и гидравлические эксперименты», изданный в 1834 году после смерти Бофуа его сыном.

Гидродинамикой не исчерпывались научные интересы Бофуа. Позднее он увлекся магнитными исследованиями, за которые был избран членом Лондонского Королевского общества, а его работа по затмениям спутников Юпитера в 1827 году была удостоена серебряной медали Астрономического общества. В историю же английского спорта Бофуа вошел как первый англичанин, поднявшийся в 1787 году на вершину Монблана.

Высокие покровители Общества по усовершенствованию корабельной архитектуры способствовали тому, что Бофуа были предоставлены уникальные возможности. Он экспериментировал близ Лондона в водоеме Гринландского дока длиной 122 м и глубиной 3,55 м. На берегу водоема воздвигли трехногую мачту, падая с которой, тяжелый груз через систему блоков приводил в движение довольно крупные модели: длина некоторых из них достигала 6—12 м! Бофуа применил важную новинку — прибор, автоматически записывающий время и пройденный моделью путь. Это настолько ускорило испытания, что с 1793 по 1798 год он смог провести около 10 тысяч опытов по измерению сопротивления тел всевозможных форм, буксируемых как на поверхности, так и глубоко под водой.

В числе этих десяти тысяч были и повторные букси-

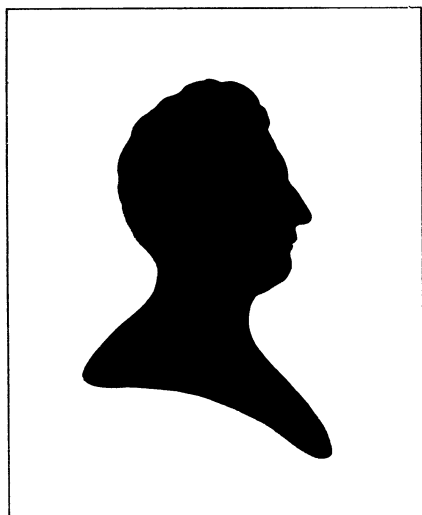
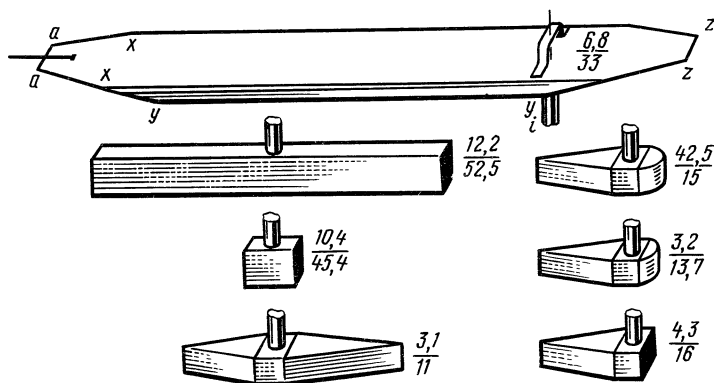


Рис. 18. Английский исследователь М. Бофуа (1764—1827), проводивший самые обширные в XVIII веке модельные испытания

Рис. 19. Некоторые модели Бофуа. Максимальное поперечное сечение всех моделей — 1 кв. фут (0,091 кв. м). Цифры около моделей показывают сопротивление в килограммах при скорости буксировки 1,5 м/с (числитель) и 3 м/с (знаменатель)



ровки форм, изученные до Бофуа Борда, французскими академиками, Чапманом. Но Бофуа был первым, кто попытался определить величину сопротивления трения, которое все его предшественники, начиная с Ньютона и кончая Дюбуа, считали пренебрежимо малым. Увы, несмотря на масштабность, результаты опытов по обнаружению трения оказались неопределенными, и сейчас считается, что Бофуа экспериментально установил важность учета трения в общем сопротивлении и его примерную пропорциональность величине поверхности пла-

стины и квадрату скорости движения, но не дал надежной формулы для вычисления сопротивления трения. Он буксировал погруженные под воду пластины на двигающихся по поверхности поплавках, влияние которых на результаты эксперимента было практически невозможно установить.

В 1801 году, спустя три года после того как Бофуа закончил свои опыты, в трудах Национального института наук и искусств Франции, заменившего после революции Парижскую академию наук, был опубликован мемуар по трению жидкостей, принадлежавший перу Ш. Кулона. Окончив военно-инженерный корпус, Кулон провел девять лет на Мартинике, занимаясь постройкой береговых укреплений. Потом служил на острове Э и в Шербурге. Как-то раз, получив задание рассмотреть проект постройки судоходного канала в Бретани, которую поддерживал военный министр, Кулон забраковал все это предприятие и оказался... в тюрьме, за то, что выразил собственное мнение, не осведомившись о взглядах своего начальника. После 1781 года Кулон, избранный членом Парижской академии наук, жил в Париже и, занимаясь исследованиями в области электричества и магнетизма, открыл знаменитый закон электростатики, носящий ныне его имя.

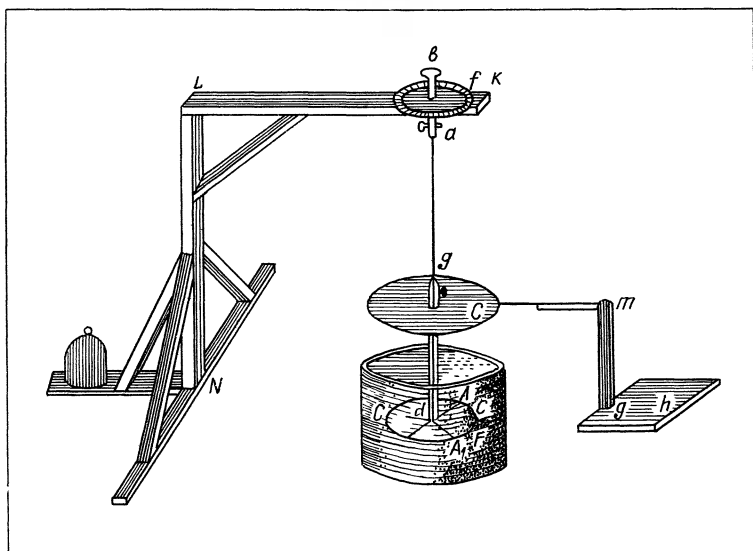
Внеся важный вклад в понимание законов упругости, прочности материалов и трения, Кулон на склоне лет решил выяснить, зависит ли от скорости сила трения, то есть та часть сопротивления, которая вызывается прилипанием жидкости к движущейся поверхности и которая действует преимущественно в плоскостях, параллельных направлению движения? Предшественники Кулона признавали существование такого жидкостного трения, но считали его пренебрежимо малым по сравнению с сопротивлением, вызываемым инерцией жидкости.

Изобретатель чувствительнейших крутильных весов, с помощью которых им было сделано немало открытий, Кулон и в этих исследованиях использовал свой излюбленный прибор. Подвесив на тонкой стальной проволоке тяжелый диск, Кулон погружал его в испытываемую жидкость и заставлял совершать крутильные колебания, измеряя при этом время их затухания. Проведя ряд опытов с разными дисками в воде и в масле, он убедился, что сопротивление трения в масле больше, чем в воде,



Рис. 20. Французский академик Ш. Кулон (1736—1806)— исследователь трения жидкостей

Рис. 21. Схема установки, на которой Кулон проводил свои исследования



и что оно не зависит ни от давления, ни от вида поверхности колеблющегося диска.

Хотя исследования последующих лет сильно разошлись с кулоновскими результатами, его опыты наряду с опытами Бофуа показали, что трением можно прене-

бегать далеко не всегда, что в ряде случаев оно может составлять значительную долю общего сопротивления тела. Но самым неожиданным и существенным результатом исследований Кулона было то, что его эксперименты вопиющим образом разошлись с экспериментами Бофуа! В то время как английский исследователь доказал, что сопротивление трения пропорционально квадрату скорости, Кулон доказал нечто совсем иное: сопротивление пропорционально первой степени скорости. Правда, условия опытов были разные. Кулон имел дело со скоростями порядка сантиметров в секунду, а Бофуа оперировал скоростями в сотни раз большими — метрами в секунду. Но только ли в разности скоростей дело? А может быть, здесь сказывается то, что в опытах Кулона движение было колебательное, переменное, а у Бофуа постоянное, прямолинейное? Ответа на эти вопросы пришлось ждать целых восемьдесят лет.

Итак, первым результатом лихорадочного строительства судоходных каналов в Англии были опыты Бофуа, показавшие, что трением можно пренебрегать далеко не всегда, но не давшие надежных количественных зависимостей. То было косвенное, опосредствованное влияние строительства каналов на развитие исследований в области гидродинамического сопротивления. Но постройка каналов стимулировала такие исследования и иным образом...

В 1834 году, когда конкуренция между каналами и железными дорогами в Англии вступила в заключительную фазу, одна шотландская судоходная компания перед лицом грядущего краха решила выяснить, что может дать пассажирскому судоходству на каналах применение паровой тяги. Для изучения этого вопроса был приглашен Дж. Скотт Рассел — блестящий молодой инженер, окончивший университеты в Глазго и Эдинбурге. Проведенные исследования прославили имя этого человека и определили всю его дальнейшую карьеру: он навсегда связал себя с судостроением, сделал ряд важных изобретений, провел несколько исследований, удостоенных почетных наград, и в 1860 году стал одним из основателей Института корабельных архитекторов.

Изучая буксировку барок в каналах, Скотт Рассел не мог не обратить внимания на замечательную быстротходность «лодок-летунов», впервые появившихся на канале между Глазго и Андроссаном в Шотландии. Их

строил некий В. Хьюстон, случайно сделавший замечательное открытие. Как-то раз его лошадь, тащившая барку, испугалась и понесла. И тут Хьюстон заметил, что когда барка достигла более высокой, чем обычно, скорости, буксирный канат ослаб и лошадь побежала гораздо легче. Сметливый англичанин обзавелся несколькими легкими суденышками длиной по 17 м и стал буксировать их по-новому. Обычно барки на каналах двигались со скоростью 6—9 км/ч. Хьюстон стал действовать иначе: лошадей погоняли кнутах до тех пор, пока они не разгоняли лодку до 14—15 км/ч. И тут происходило чудо: лодка дальше продолжала двигаться на гребне своей собственной волны и не оставляла за собой никаких волн.

Скотт Рассел исследовал это явление на полукилометровом прямолинейном участке канала, соединявшего реки Клайд и Форт, глубиной 1,2—1,5 м. Он разгонял 6-тонную барку, измеряя ее скорость и усилие на канате. И что же оказалось? При скорости около 14 км/ч потребное для буксировки усилие резко падало: при 12 км/ч оно составляло 225 кг, а при 14 км/ч — 127 кг. Почти вдвое меньше!

Результаты своих исследований Скотт Рассел изложил в статье с длинным названием, удостоенной в 1840 году большой золотой медали Королевского общества в Эдинбурге: «Экспериментальные исследования законов гидродинамического явления, сопровождающего движение плавающих тел и не приведенного в согласие с известными законами сопротивления жидкостей». Что же это было за явление?

Скотт Рассел установил, что если на одном конце длинного канала резким толчком создать повышение уровня, то возникший при этом водяной бугор, сохраняя свою форму, начнет двигаться вдоль канала со скоростью, зависящей только от его глубины. Другими словами, у каждого канала есть некая «характеристическая скорость», равная скорости так называемой переносной волны.

А что происходит в канале при движении по нему судна?

В первые мгновения перед носом барки создается передняя ведущая волна, а за кормой возникают бегущие назад волны, причем скорость и передней и кормовых волн равна скорости судна. Энергия, затрачива-

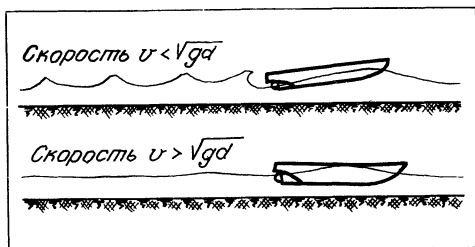


Рис. 22. Схема движения лодки в канале при докритической скорости (вверху) и сверхкритической (внизу)

емая в этом случае на буксировку, расходуется не только на преодоление трения, но и на поддержание системы кормовых волн. Но вот скорость движения барки достигает «характеристической скорости» для данного канала. В этот момент кормовые волны исчезают и остается только передняя ведущая волна, «оседлав» которую, судно движется вдоль канала, требуя извне энергию только на компенсацию трения...

Хотя Скотт Рассел очень гордился открытием и исследованием переносной волны, впоследствии выяснилось, что все это было сделано задолго до него Лагранжем, который еще в 1788 году аналитически исследовал движение волны бесконечно малой высоты в канале конечной глубины и установил правильную зависимость скорости ее распространения от глубины. Тем не менее, погребенное в математических дебрях «Аналитической механики», это открытие не обратило на себя ничьего внимания и было переоткрыто и доведено до общественного сознания именно Скоттом Расселом.

Изучая творчество этого инженера, трудно отделаться от мысли, что он принадлежал одной половиной души минувшему XVIII веку, а другой — грядущему XIX. И этой двойственностью своего инженерного дарования он поразительно соответствовал некоей двойственности промышленного развития Англии — страны, где старое причудливо сплелось с новым. Страны, где позже, чем в других странах, стали строить судоходные каналы с барками и лошадьми и раньше, чем в других, — железные дороги и пароходы.

Оказавшись на стыке этих двух эпох в развитии ан-

глийской промышленности, Скотт Рассел, следуя практическому духу своей страны и своего времени, поспешил перекинуть мост между ними: принцип, найденный им при исследовании буксировки барки в канале, он попытался приложить к проектированию морских судов, приводимых в движение паровой машиной. Без достаточных к тому оснований отождествив волну, поднимаемую носом судна, с переносной волной в канале, Скотт Рассел на этом предположении создал теорию образования носовой оконечности судна. Корпус, спроектированный согласно этой теории, считал он, будет корпусом наименьшего волнового сопротивления. Он не только разработал и пропагандировал такую теорию, но и за годы своей инженерной деятельности настроил в соответствии с ней немало пароходов. И хотя впоследствии выяснилось, что он заблуждался, что его разработки были лишены научной строгости, Скотт Рассел сыграл важную роль в развитии гидродинамики корабля: именно он первым обратил внимание своих современников на важность учета волнового сопротивления в проектировании кораблей.

Сопротивление, рожденное волной

Первые смутные догадки о том, что волны, возникающие от гребня воды перед носом движущегося корабля, и впадины за кормой, должны оказывать влияние на его сопротивление, высказал испанский ученый Дон Хорхе Хуан-и-Сантацилла (1712—1783).

Участник знаменитой экспедиции 1735 года, организованной Парижской академией наук для градусных измерений близ экватора, он проявил блестящие математические способности, опубликовал ряд астрономических работ и в 1751 году основал астрономическую обсерваторию в Кадисе. Долгое время он пробыл в Англии, изучая проблемы кораблестроения, потом строил арсеналы в Ферроле и Картахене и выполнял разнообразные поручения правительства — от финансовых — наладил чеканку монеты — до дипломатических — был испанским послом в Марокко. Наконец, именно Хуану-и-Сантацилле Испания обязана организацией в 1755 году первого в стране научного общества — Ассамблеи Амитоza Литерариа. В своем капитальном труде, изданном в Мадриде в 1771 году, он развил очень важную

мысль: в волне в вертикальной плоскости частицы жидкости совершают круговые движения, а профиль волны при этом представляет собой циклоиду...

Имя Сантациллы было достаточно хорошо известно в научных кругах того времени, вот почему парижские академики Боссю и Кондорсе при проведении своих опытов в Мезьере в 1775 году уделили серьезное внимание описанию носовой волны, создаваемой буксируемой моделью. Почти одновременно с ними аналогичные эксперименты проводил в Ла-Рошели Н. Ромм, который также установил, что создаваемые при движении модели волны влияют на сопротивление корпуса, но «закономерности этого процесса по-прежнему остаются невыясненными».

Таким образом, в XVIII веке экспериментальные исследования не дали никакого рационального подхода к проблеме изучения волнового сопротивления. Что касается более общего и абстрактного вопроса — создания гидродинамической теории поверхностных волн, — то он явил математикам такие головоломные трудности, что даже крупнейшие из них отступились от решения задачи в общем виде. Чтобы найти хоть какой-нибудь подход к этой проблеме, нужно было найти некие допущения, способные существенно упростить задачу. Считается, что такие допущения были впервые предложены чешским инженером Ф. И. Герстнером, опубликовавшим в 1804 году свою ставшую классической «Теорию волн».

Уроженец Богемии, Герстнер начал свою техническую карьеру в Пражской обсерватории, где некогда работали Тихо Браге и Кеплер. Затем он изучал математику в Пражском университете, был межевым инженером, а в 1806 году стал основателем и первым директором Пражского политехникума. Круг научных интересов Герстнера* — механика, гидравлические машины, сопротивление материалов, течение жидкостей в трубах и каналах.

Какое же допущение для облегчения построения теории волн предложил Герстнер?

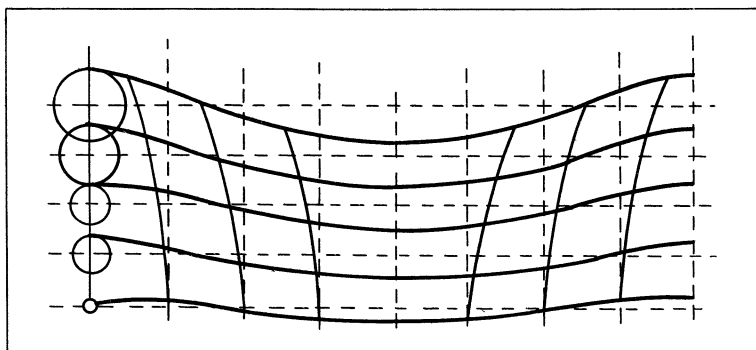
Он предположил, что при значительной глубине мо-

* Имя Герстнера встречается и в истории русской техники, но это имя его сына Ф. А. Герстнера (1793—1840), одного из организаторов постройки в 1837 году первой в России железной дороги между Петербургом и Царским Селом.



Рис. 23. Чешский инженер
Ф. Герстнер (1756—1832)—
создатель теории трохои-
дальных волн

Рис. 24. Схема построения
трохоидальных волн



ря реальные волны мало отличаются от гипотетических трохоидальных волн, для построения которых следует соблюдать следующие допущения. Каждая частица жидкости описывает в вертикальной плоскости круг, центр которого неподвижен; движение по кругу равномерное. Частицы, расположенные на поверхности, описывают круг наибольшего радиуса. Для частиц, расположенных на глубине, величина радиуса быстро уменьшается. При таких допущениях поверхность волны принимает форму циклоиды, а слои, находящиеся под ней,— трохойды.

Максимально упростив таким образом задачу, Герстнер вывел формулы, связавшие главные характеристики волнового движения — скорость распространения волны, ее длину и период. И сопоставление вычисленных им цифр с данными наблюдений дало такое прекрасное совпадение, что Герстнер по праву считается основоположником теории элементарных волн на глубокой воде. Вот почему стоит с почтением отнестись к идеям Хуана-и-Сантациллы, высказанным им за несколько десятилетий до Герстнера...

Своей теорией трохонидальных волн в идеальных жидкостях Герстнер, можно сказать, создал новую область исследований, чрезвычайно привлекательную для чистых математиков; и в первой половине века дань этой модной теме отдали самые крупные представители «королевы наук». Среди них мы видим французов О. Коши (1789—1857) и С. Пуассона (1781—1840), русского М. Остроградского (1801—1861), немца Г. Гельмгольца (1821—1894), целую когорту англичан — Дж. Стокса (1819—1903), Дж. Эйри (1801—1892) и других. В их трудах были поставлены и решены многие новые задачи по теории идеальных жидкостей: распространение волн в каналах, волновые процессы на границах раздела двух жидкостей разной плотности, движение волн на глубокой и мелкой воде. Но первый наиболее важный для теории корабля вклад в изучение волновых процессов сделал знаменитый английский ученый У. Томсон — лорд Кельвин.

При упоминании этого имени в представлении большинства современных людей возникает абсолютная шкала температур с ее градусами Кельвина, в которых увековечен его вклад в термодинамику. Но термодинамика отнюдь не была делом всей жизни У. Томсона. Как это ни парадоксально, по достоинству оценить вклад Кельвина в науку нам, привыкшим к узкой специализации, мешает именно обилие, разносторонность и глубина его работ по математике, механике, акустике, оптике, термодинамике, электротехнике, геологии, астрономии, навигации.

В 1892 году, когда У. Томсона избрали президентом Института морских инженеров, он сказал: «В душе я — моряк!», и ученый не грешил против истины. Ему принадлежало не только множество важных изобретений, связанных с морским делом, но и первое теоретическое

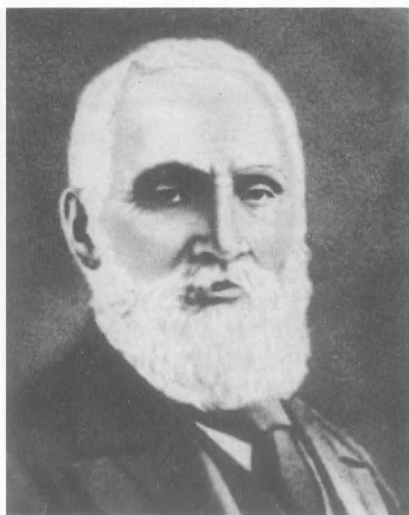
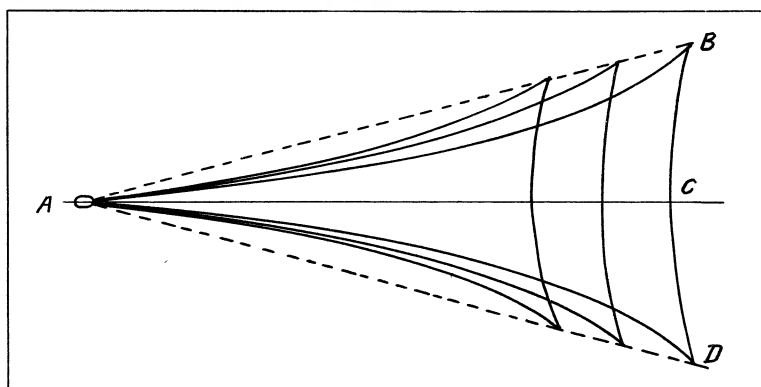


Рис. 25. Английский ученый У. Томсон — лорд Кельвин (1824—1907)

Рис. 26. Волновая система, создаваемая на поверхности воды движущейся точкой



исследование системы волн, распространяющихся от точки, движущейся по поверхности идеальной жидкости.

Путем математических расчетов Кельвин установил, что за точкой, движущейся по поверхности жидкости, создаются волны, в плане имеющие вид как бы вложенных один в другой равнобедренных треугольников с вогнутыми внутрь сторонами и с вершинами, лежащими в движущейся точке. Боковые стороны треугольников с

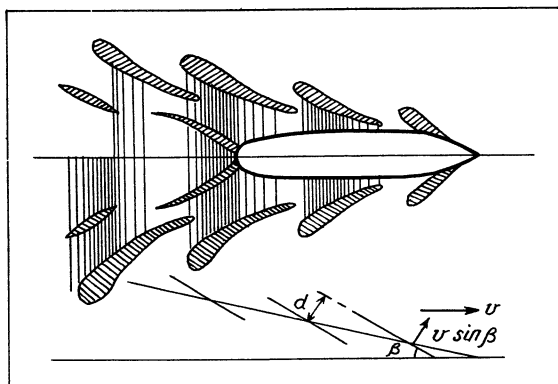


Рис. 27. Волновая система, создаваемая корпусом движущегося по поверхности воды корабля

течением времени расходятся все больше и больше, постоянно оставаясь между двумя прямыми, исходящими из движущейся точки под углом $38^{\circ}56'$. Величина этого угла не меняется и не зависит от скорости движения точки. Что же касается волн, замыкающих расходящиеся боковые гребни и лежащих в основании каждого треугольника, то они практически остаются на месте и отделены друг от друга расстоянием, равным длине трохoidalной волны при данной скорости точки. Итак, образно говоря, движущаяся точка как бы непрерывно генерирует на поверхности волновые треугольники и по мере своего удаления вытягивает их все сильнее и сильнее.

Если же вместо точки движется протяженный по длине корпус корабля, то картина усложняется. Вершины треугольников уже не удерживаются в носовой точке. Расщепившись, они начинают скользить вдоль борта и, постепенно расходясь, отрываются от него, тут же замыкаясь второй поперечной волной. В результате вместо вытягивающихся вдоль направления движения треугольников возникает серия равнобедренных трапеций, постепенно растягивающихся в направлении, перпендикулярном направлению движения. При этом высота трапеций равна длине трохoidalной волны. Но это наблюдение носило качественный характер и не давало

ключа к вычислению волнового сопротивления корпуса данной формы.

Таким образом, в истории развития учения о гидродинамическом сопротивлении XVIII век сыграл необычную роль. Богатый и теоретическими, и экспериментальными исследованиями, он тем не менее оказался весьма скудным в получении научных теорий, соответствующих действительности. И прав был выдающийся русский гидроаэромеханик Н. Е. Жуковский, когда в 1880-х годах невысоко оценивал результаты, достигнутые в XVIII веке в области гидродинамического сопротивления с помощью одной только математики. «От гидродинамики Даниила Бернулли, — говорил он, — у нас осталась только теорема его имени... гидродинамика Д'Аламбера с его гипотезой шаровидных частичек вся отошла в Лету; Эйлер хотя и вывел уравнения гидродинамики... сам очень мало воспользовался ими для решения задач о сопротивлении среды».

С другой стороны, мы видим ряд искусных экспериментаторов, которые разрушили теоретические представления своих предшественников и современников, но взамен не дали ничего, кроме чисто качественных объяснений физического смысла некоторых процессов, связанных с гидродинамическим сопротивлением. Правда, именно в этот период был достигнут важный результат — сопротивление удалось четко разделить на три компоненты — сопротивление формы, трения и волновое. Но так или иначе, к середине XIX века ни теоретики, ни экспериментаторы все еще не могли ответить на самый главный и насущный вопрос практики: как вычислить сопротивление корпуса будущего судна?

Глава IV. МАЛЕНЬКИЕ МОДЕЛИ, БЕЗ КОТОРЫХ НЕВОЗМОЖНЫ БОЛЬШИЕ КОРАБЛИ

В

1858 году сошел на воду один из самых удивительных в истории кораблей — знаменитый «Грейт Истерн», предназначенный для рейсов в Индию вокруг Африки без пополнения запасов топлива. Газетчики не упустили случая подсчитать, что «Грейт Истерн» был больше, чем библейский Ноев ковчег. Что водоизмещение гиганта — 32 160 т — превосходит вес всех 197 английских кораблей, которые отразили некогда испанскую «Непобедимую армаду». Что мощность двух паровых машин «Грейт Истерн» — 11 тыс. л. с. — достаточна для приведения в действие всех ткацких фабрик Манчестера. Что никогда еще не выходил в море корабль, у которого было бы шесть мачт, пять труб и пять с лишним тысяч квадратных метров парусов. Лишь через 49 лет в 1907 году — сошло на воду судно, превзошедшее размерами «Грейт Истерн» — то была «Лузитания»...

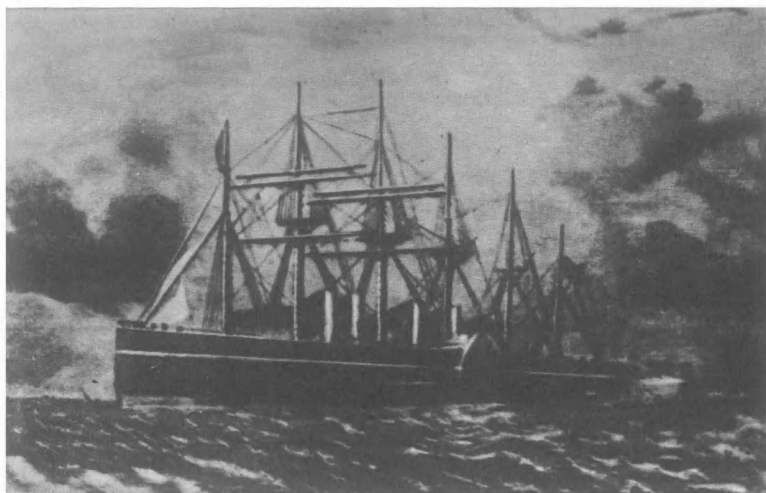
Нетрудно представить себе, какое потрясающее впечатление должен был произвести этот пароход на современников. Постройка «Грейт Истерн» была настоящим технологическим взрывом в XIX веке, давшим могучий толчок развитию английской, да и мировой промышленности. Она стимулировала быстрое распространение железного и стального судостроения, совершенствование паровых машин и котлов, внедрение новых принципов в проектирование корабельных конструкций.

Но кроме такого общего воздействия на технологию и производство, постройка «Грейт Истерн» внесла особый вклад в развитие учения о сопротивлении корабля. И получилось так, что с судьбой знаменитого парохода оказались причудливо связанными судьбы трех людей, сыгравших видную роль в теории корабля.



Рис. 28. Английский инженер И. Брюнель (1806—1859)

Рис. 29. Знаменитый пароход И. Брюнеля «Грейт Истерн»



Уроки Изамбара Брюнеля

Инициатором постройки, главным конструктором и руководителем всего дела был Изамбар Брюнель — быть может, самый крупный инженер первой половины XIX века, построивший 25 железных дорог, 125 мостов, 8 причалов и сухих доков, двухмильный железнодорожный туннель Бокс, долгое время остававшийся самым длинным туннелем в мире, и три парохода — «Грейт Вестерн», «Грейт Бритн» и «Грейт Истерн», каждый из которых составил эпоху в истории парового океанского судоходства. Даже сто пятьдесят лет назад, когда процветал инженерный универсализм, едва ли нашелся бы еще один инженер, способный представить такой список работ. Если же учесть, что каждое творение Брюнеля выделялось значительностью и оригинальностью, то нетрудно понять, почему некоторые исследователи склонны ставить его в один ряд с Леонардо да Винчи, в ряд художников по натуре и инженеров по профессии.

Когда Брюнель задумал постройку грандиозного корабля, способного ходить в Индию без возобновления запаса топлива в пути, он не смог найти в Англии человека более сведущего в железном судостроении, чем Скотт Рассел. Владелец верфи в Миллуоле на Темзе, он предложил придать корпусу будущего корабля разработанную им «гидродинамическую волновую форму», при которой якобы волновое сопротивление получается наименьшим. Брюнель согласился, хотя от его внимания не ускользнуло то, что Скотт Рассел, толкуя о наименьшем сопротивлении, не в состоянии ответить на самый главный для конструктора вопрос: машины какой мощности нужны для того, чтобы сообщить судну заранее назначенную скорость. По-видимому, эта проблема давно интересовала и беспокоила великого инженера, ибо одному из своих помощников по постройке «Грейт Истерн» он дал совет всерьез заняться теорией сопротивления судов. Этим помощником был Уильям Фруд.

Так, в крупнейшем событии промышленного мира в середине XIX века — в постройке гиганта «Грейт Истерн» — оказались связанными в один узел судьбы У. Фруда, создавшего классическую методику модельных испытаний, и Скотта Рассела — его постоянного оппонента и принципиального противника моделей...

Исследуя переносные волны в каналах, Скотт Рас-

сел заинтересовался возвышением воды перед носом движущегося по поверхности жидкости судна и углублением, возникающим за его кормой. Мысль о том, что эти изменения уровня близ движущегося корабля влияют на его сопротивление, была отнюдь не нова. Но только Скотт Рассел попытался практически воспользоваться этим наблюдением.

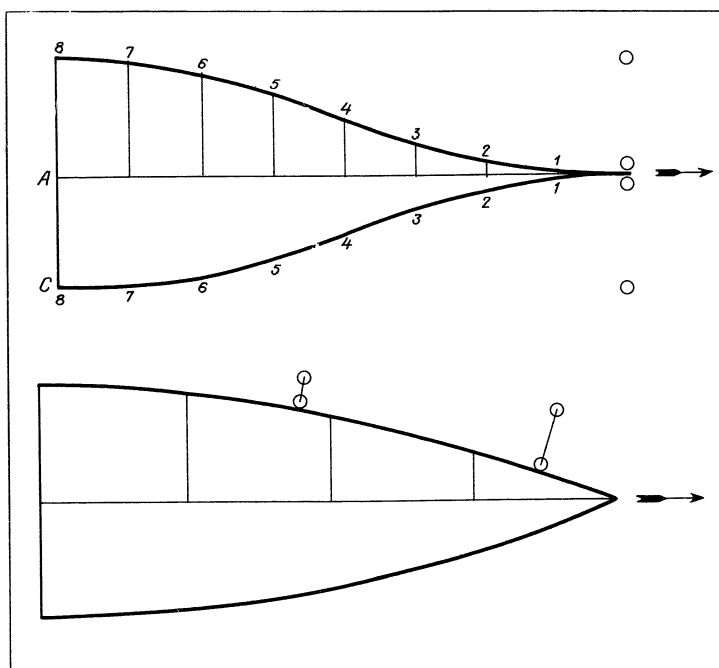
Разве нельзя снизить сопротивление, придав носу такую форму, при которой частицы воды не поднимались бы перед ним буруном, а легко соскальзывали в стороны без толчков и ударов? Для этого, очевидно, надо придать оконечности носа форму острого постепенно расширяющегося клина, без удара входящего в воду. Тогда частицы жидкости, бегущие вдоль борта корабля, будут плавно ускоряться, переходя с вогнутой части борта на выпуклую, достигая самой широкой части корпуса — миделя, а потом так же плавно замедляться, передавая на корму всю приобретенную при разгоне скорость. Для проверки своей догадки Скотт Рассел построил три лодки, отличавшиеся только обводами, и испытал их на спокойной воде при одинаковых скоростях.

Насыпав на поверхность множество плавающих стеклянных шариков, исследователь воочию убедился, что когда нос лодки имел обычные в судостроении выпуклые обводы параболических форм, шарики ударялись об нос, отскакивали от него и, можно сказать, «путались перед носом». Когда нос представлял собой плоскогранный клин, поведение шариков было таким же, но менее интенсивным. При движении же третьей лодки, у которой обводы сходились у острия вогнутыми дугами, постепенно переходящими у миделя в выпуклые кривые, шарики, не отскакивая, плавно двигались вдоль бортов лодки, создавая перед носом наименьшее возвышение воды. Сочтя, что при этом и сопротивление получается минимальным, Скотт Рассел провел весьма произвольную и малообоснованную аналогию между движением водяных частиц, расступающихся перед носом корабля, и качанием маятника и, опираясь на нее, дал геометрический способ построения обводов судна в форме так называемой волновой линии — синусверсоиды, представляющей собой вогнуто-выпуклую кривую. У корабля с такими обводами носа, утверждал Скотт Рассел, будет наименьшее волновое сопротивление.



Рис. 30. Английский инженер
Д. Скотт Рассел (1808—1882)

Рис. 31. Носовые обводы судна «волновой формы», предложенной Скоттом Расселом (вверху), и судна обычной формы (внизу)



Будучи не только ученым и инженером, но и предпринимателем, он сначала в Эдинбурге, а потом в Лондоне построил несколько десятков судов с такими обводами и будто бы при сравнении с кораблями обычных форм нашел для своих конструкций меньшее сопротивление. Мы говорим «будто бы», потому что сопоставление между собой натуральных пароходов необычайно сложно и зависит не только от их обводов, но и от десятков других причин: от совершенства винта или колес, от устройства котлов и машин, от трения в механизмах, от скорости, волнения, крена и даже от квалификации и опытности кочегаров и механиков. Выявить из этой массы влияющих факторов один — форму корпуса — практически невозможно. Тем не менее Скотт Рассел поспешил объявить свою теорию подтвердившейся и на ее основе разработал наивыгоднейшие размеры и формы носа и кормы, а также вывел эмпирические формулы для оценки сопротивления «корабля волновых обводов».

Сравнительно широкое распространение волновой формы Скотта Рассела, который первым озаботился снижением волнового сопротивления, со временем породило, как это ни покажется на первый взгляд парадоксальным, усиленный интерес к исследованию трения и фрикционные теории сопротивления. Все началось с того, что, когда в 1850-х годах появились длинные корабли с волновыми обводами, оказалось: их сопротивление гораздо больше, чем следовало из формул Скотта Рассела, и никакого преимущества перед судами обычных форм такой же длины у них нет. Пытаясь как-то объяснить этот факт и полагая, что у кораблей скотт-расселовой формы волновое сопротивление пренебрежимо мало, некоторые исследователи пришли к выводу: сопротивление таких кораблей зависит главным образом от трения. Так, мнимо очистив сопротивление судов от волновых эффектов, Скотт Рассел способствовал тому, что инженеры-кораблестроители и ученые-прикладники сосредоточили свое внимание на исследовании эффектов трения. И во всех странах, усиленно строивших тогда паровые флоты, появляются разновидности фрикционных теорий сопротивления. Во Франции такими работами занимался Буржуа, в России — С. Бурачек, в Англии — У. Ранкин...

Имя Ранкина — шотландского инженера и учено-

го — знакомо представителям многих специальностей. В теплотехнике его именем назван цикл паросиловой установки. В железнодорожном деле есть метод Ранкина для разметки закруглений пути. В сопромате он разработал методы и формулы для определения напряжений в рамах и каменных плотинах. В физике ему принадлежат первые работы по молекулярно-кинетической теории газов. Более глубокие знатоки истории техники в числе проблем, интересовавших Ранкина, называют волновую теорию света, теорию музыки, геологию. И в этой широте научных интересов отразилась любопытная черта биографии У. Ранкина (1820—1872).

Сын отставного военного, занявшегося железнодорожным строительством, Ранкин после окончания Эдинбургского университета тоже стал инженером-путейцем, а потом строителем ряда каналов и портов. И вдруг в 1848 году в нем произошла труднообъяснимая перемена: он бросил прибыльную и удачно сложившуюся инженерную карьеру и стал физиком-теоретиком, сосредоточив свои усилия на разработке молекулярно-кинетической теории. За эти работы в 1853 году Ранкин был избран в Лондонское Королевское общество. Спустя два года он занял инженерную кафедру Глазговского университета, с которой и связано создание его классических учебных курсов по большинству отраслей тогдашней техники. Именно в этот период разработал он и свою знаменитую фрикционную теорию сопротивления кораблей, вошедшую во все учебники по кораблестроению того времени.

Суть теории Ранкина состояла в том, что все сопротивление трения, принципиально отличное от сопротивления формы и волнового, ученый считал равным произведению коэффициента трения на квадрат скорости судна и на площадь его подводной поверхности. Но вот беда: скорости, с которыми движутся вдоль бортов частицы трущейся с ними жидкости, во-первых, не постоянны и меняются как по длине, так и по ширине судна, а во-вторых, они никак не равны поступательной скорости движения всего корабля. Считая вычисление поля этих скоростей делом практически безнадежным, Ранкин предложил учесть это несоответствие с помощью некой поверхности. Вместо действительной площади подводной поверхности он предложил ставить в формулу величину, которую он назвал «приращенная подвод-

ная поверхность» — то есть такая плоская поверхность, которая при движении со скоростью судна будет иметь такое же сопротивление, как действительная криволинейная подводная часть, обтекаемая жидкостью с переменными скоростями. Метод вычисления этой поверхности и составлял суть его теории.

Говорят, что фрикционная теория Ранкина давала такие прекрасные совпадения с действительностью, что некоторые его друзья-судостроители даже возражали против ее опубликования и предлагали хранить в тайне, как секрет ремесла. Но сама постановка задачи у Ранкина была далека от научной. В самом деле, его теория годилась только для кораблей скотт-расселовой формы, сопротивление которой будто бы свободно от волновых эффектов и потому-де зависит лишь от трения. Выходит, по формулам Ранкина можно было рассчитать сопротивление только судов волновой формы, но нельзя было вычислить сопротивления простейших геометрических тел вроде шара или конуса и корпусов, отличных от корпусов волновой формы.

Поэтому У. Фруд решил сосредоточить все свое внимание на исследованиях моделей. Но именно этот путь на протяжении многих лет яростно отвергали Скотт Рассел и Ранкин! А их возражения против моделей было не так-то легко скинуть со счетов...

Добившись немалого предпринимательского успеха в постройке кораблей гидродинамических волновых форм, Скотт Рассел мог только раздражаться, узнавая о том, что модельные испытания неизменно противоречат его, казалось бы, оправдавшейся на практике теории. Более того, потратив уйму времени на модельные эксперименты, он всегда терпел неудачу, когда пытался перенести полученные на моделях результаты на натурные суда, что в конце концов убедило его в полной бесперспективности моделирования в развитии теории корабля.

У Ранкина же были более тонкие научные возражения. Во-первых, утверждал он, модели создают относительно более крупные волны, чем натурные суда. А во-вторых, вязкость воды должна проявляться тем сильнее, чем мельче модель.

От таких возражений нельзя было просто отмахнуться. Их надо было убедительно и строго научно преодолеть. И У. Фруду удалось сделать это.

У. Фруд работал химиком и механиком в одном из

оксфордских колледжей, когда в 1838 году он был приглашен Брюнелем на строительство железной дороги между Бристолем и Эксетером в его родном Девоншире. Позднее по просьбе Брюнеля он изучал качку судов, потом экспериментировал с гребными винтами и моделями. Совет Брюнеля заняться теорией сопротивления попал на подготовленную почву: зрелый сорокалетний инженер и математик с увлечением начал экспериментировать с самоходными моделями в каналах и водоемах. В 1859 году Фруд даже построил около своего дома в Торкее гравитационный опытовый бассейн. Но так или иначе к 1867 году после проведения в устье реки Дарт обширных испытаний геометрически подобных моделей разной длины — 91, 182 и 366 см — он уже знал ответы на возражения своих оппонентов.

Различие в размерах волн, возбуждаемых моделью и натурным судном, на которое указывал Ранкин, Фруд объяснял тем, что сравнение должно производиться не при равных скоростях, а при так называемых соответственных скоростях. Второе возражение Ранкина — различное влияние вязкости на крупные и мелкие модели — оказывалось несущественным, когда длина модели превосходила 180 см. Что же касается невозможности пересчета данных модели на натуру, на что указывал Скотт Рассел, то преодоление этой трудности с помощью открытого Фрудом закона подобия составило его бессмертную заслугу перед мировым кораблестроением...

6 сентября 1871 года неподалеку от берегов Испании перевернулся и погиб во время шквала новейший английский броненосец «Кептен», причем из нескольких сот человек его экипажа удалось спастись всего восемнадцати матросам. И как это ни парадоксально, история создания и гибели этого корабля оказалась причудливым образом связанной с Фрудом и постройкой первого в мире опытового бассейна.

С 1863 года английский морской артиллерист капитан Кольз осаждал Адмиралтейство проектами постройки мореходного броненосца, совмещающего башни и низкий борт первых мониторов с полным парусным вооружением фрегатов. Главный строитель британского флота Э. Рид убеждал Адмиралтейство, что такой корабль перевернется при первом же шторме. Стремясь доказать свою правоту, он использовал все мыслимые средства: расчеты, графики, чертежи и даже модели.

Именно в эти годы Рид, хорошо знакомый с трудами Фруда по качке, решил в своей борьбе опереться на репутацию признанного в научных и кораблестроительных кругах специалиста. Именно Рид убедил Фруда 24 апреля 1868 года направить в Адмиралтейство меморандум, в котором доказывалась необходимость постройки для нужд британского флота опытового бассейна для изучения на моделях остойчивости и сопротивления судов.

Несмотря на сильную оппозицию общества, парламента и даже некоторых членов Института корабельных архитекторов во главе со Скоттом Расселом, Адмиралтейство в феврале 1870 года выдало Фруду две тысячи фунтов стерлингов на постройку бассейна, опробование механизмов которого началось уже в 1871 году, как раз тогда, когда в полном соответствии с предсказанием Рида у берегов Испании погиб «Кептен». Эта катастрофа убедила всех в необходимости уделять серьезное внимание вопросам остойчивости кораблей, и тайная цель Рида, которую он преследовал при основании бассейна, отпала. И именно этим объясняется тот удивляющий историков факт, что в отчетах работы опытового бассейна так никогда и не появились упоминания о том ряде экспериментов по качке плавающих тел, в особенности по качке плавающих тел эллипсоидальной формы, которые были предписаны Фруду при утверждении проекта. И с самого начала все усилия экспериментатора сосредоточились на изучении сопротивления корабля.

Фруд первый понял: волновые системы у геометрически подобных моделей получаются подобными только тогда, когда на длине обеих моделей укладывается одинаковое число поперечных волн. Другими словами, у маленькой модели и волны должны быть маленькие, а поскольку длина поперечной волны зависит только от скорости, то короткую модель нужно буксировать медленнее, чем длинную. Несложные расчеты показывают, что эти скорости должны находиться в соотношении, равном корню квадратному из масштаба. То есть если одна модель, скажем, в четыре раза длиннее другой, то их волновые системы будут подобными только тогда, когда большую буксируют в $\sqrt{4}=2$ раза быстрее, чем малую. Скорости, связанные таким соотношением, и называются соответственными. Только при них у геометрически подобных корпусов наблюдается гидродинамическое по-

добие волновых систем, в котором как раз и скрыт весь секрет модельных испытаний.

Только при гидродинамическом подобии можно легко вычислить волновое сопротивление натурного корабля по измеренному экспериментально волновому сопротивлению его модели. Для этого достаточно умножить сопротивление модели на куб масштаба. В нашем примере, чтобы вычислить сопротивление крупной модели, достаточно умножить измеренное в эксперименте сопротивление малой модели на $4^3=64$!

Таким образом, будь вода идеальной жидкостью, все решалось бы очень просто: точную геометрическую копию будущего корабля надо было бы прогнать с соответственной скоростью в бассейне, измерить ее сопротивление и умножить его на куб масштаба.

Но, увы, вода отнюдь не идеальная жидкость. Она наделена вязкостью, внутренним трением, которое смазывает четкость чисто инерционной картины. При прогонке модели в бассейне динамометр измеряет не только волновое сопротивление, но и сопротивление трения, а разделить их при измерении невозможно. Это делает невозможным и тот простой пересчет с модели на натуру, который приведен выше. В преодолении этой трудности и состоит главный вклад У. Фруда в изучение гидродинамического сопротивления.

Осознав, что раздельное измерение волнового и фрикционного сопротивления модели невозможно, он решил произвести такое разделение расчетным путем. Если фрикционное сопротивление модели зависит от площади подводной части и качества ее поверхности, то, измерив динамометром ее суммарное сопротивление, можно вычесть из него вычисленную по формулам фрикционную часть, тогда остаток и будет величиной волнового сопротивления модели. Умножив эту величину на куб масштаба, можно получить волновое сопротивление натурного корпуса и, прибавив к нему рассчитанное по формулам сопротивление трения натурного корпуса, вычислить полное сопротивление будущего корабля.

Выходит, как это ни парадоксально, ключ к изучению волнового сопротивления — это исследование сопротивления трения, выведение той самой формулы, по которой необходимо вычислять фрикционное сопротивление и модели, и натурного судна. Вот почему, прежде чем начать исследования волнового сопротивления,

Фруд должен был произвести измерения трения досок и пластин, по строгости, масштабам и объему работ превосходившие эксперименты Бофуа, на которые в свое время была истрачена рекордная сумма в 50 тысяч фунтов стерлингов. И вот почему ему пришлось просить Адмиралтейство о выделении средств на постройку опытового бассейна...

Боевые качества парового флота сильно зависели от скорости, мощности, дальности плавания и расхода топлива кораблей. Поэтому Адмиралтейство Англии готово было на любые затраты и на любые эксперименты, лишь бы получить достаточно надежные методы оценки этих характеристик. В 1869 году в качестве альтернативы опытовому бассейну рассматривалась буксировка натурального судна другим кораблем, чтобы точно измерить сопротивление корпуса и сопоставить мощность, необходимую для буксировки, с действительно расходуемой при ходе судна под собственными машинами. Фруд возражал против столь дорогостоящих и тем не менее малодостоверных испытаний, но такова была потребность в надежных данных, что Адмиралтейство утвердило и натурные буксировки, и постройку опытового бассейна. Это впоследствии дало Фруду уникальную возможность проверить как точность цифр, получаемых при испытании моделей, так и правильность метода их обработки, в основу которого он положил открытый им закон гидродинамического подобия.

Первый в мире опытовый бассейн, вступивший в строй в марте 1872 года, был построен близ дома Фруда в Торкее и представлял собой крытый легкой деревянной кровлей канал длиной 110 м. 60-метровый измерительный участок имел ширину по уровню воды 11 м и глубину 3 м, с двух сторон к нему примыкали разгонный и тормозной участки шириной 3,4 и глубиной 0,9 м. Наклонные стенки канала были утрамбованы и покрыты асфальтом. Модели буксировались тележкой с измерительными приборами, которая двигалась по рельсовому пути с помощью паровой лебедки, способной разгонять ее до 5 м/с.

Именно здесь в течение двух лет Фруд произвел свои уникальные исследования по сопротивлению трения. В отличие от Бофуа он буксировал доски, подвешенные не к поплавкам, а к тележке, бегущей по рельсам, и измерял сопротивление не величиной падающего груза, а

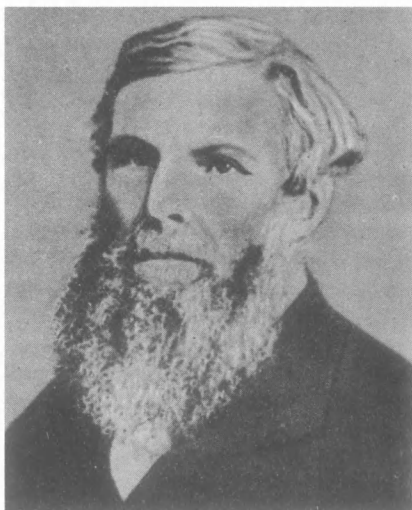
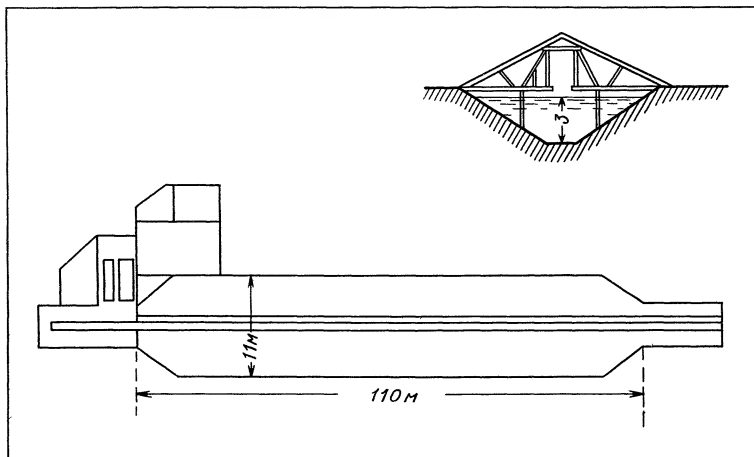


Рис. 32. Английский инженер У. Фруд (1810—1879) — создатель классической методики модельных испытаний

Рис. 33. Схема первого опытового бассейна, построенного Фрудом в Торкее



пружинным динамометром. Благодаря этим и некоторым другим ухищрениям ему удалось свести все побочные трения сопротивления до $1/20$, в то время как у Бофуа они достигали $5/6$!

Фруд исследовал доски постоянной толщины (3 мм) и ширины (53 см) длиной от 0,6 до 15 м, которые буксировались со скоростями от 0,5 до 4 м/с, при разных покрытиях их поверхности: лак, парафин, олово, коленкор,

мелкий, средний и крупный песок, а также краски, применяемые в судостроении. Все полученные данные уложились в простую формулу, согласно которой сопротивление трения пропорционально площади поверхности, коэффициенту трения и скорости в степени от 1,88 до 2. Потом Фруда критиковали за то, что цифры, полученные для плоских досок, он использовал при вычислении сопротивления трения изогнутых корабельных бортов. Но практическая интуиция инженера не подвела его, и несколько десятилетий спустя крупнейший американский специалист по сопротивлению корабля Д. Тейлор высоко оценил заслуги Фруда, который, «работая в опытном бассейне, грубом и примитивном по сравнению с современными, разработал методы и количественные коэффициенты, надежно служившие корабельным архитекторам почти пятьдесят лет».

Эти надежные данные позволили У. Фруду и его сыну и преемнику Р. Фруду (1846—1924) за несколько лет решить массу важных практических вопросов, интересовавших кораблестроителей. Причем это были не только вопросы гидродинамического сопротивления. Отец и сын Фруды с помощью моделей немало сделали в исследовании качки и остойчивости, работы успокоительных цистерн, маневренности судов и работы гребного винта. И все-таки большую часть своих исследований они посвятили анализу гидродинамического сопротивления и сопутствующих процессов.

Чародеи из Торкея

Первой моделью, испытанной в Торкее 3 марта 1872 года, была модель корабля «Грейхаунд», уже давно находившегося в строю. Фруд спешил получить данные для сопоставления их с результатами натурных испытаний. Они были проведены в 1871 году под его же руководством. На крейсере II ранга «Эктив» перпендикулярно к правому борту установили четырнадцатиметровую стрелу, к концу которой на шестидесятиметровом канате был прикреплен «Грейхаунд». Благодаря такому устройству исключалось всякое действие попутного следа и волн от буксирующего судна на буксируемое. В ходе этих испытаний Фруд установил несколько важных фактов. Во-первых, выяснилось, что необходимая для движения судна мощность составляет всего 45% мощности, развиваемой машинами. Это значит: 55% мощности расходует-

ся впустую на трение в подшипниках и, главным образом, на потери, вызываемые гребным винтом. Во-вторых, — и это было для Фруда самым главным — результаты натурных испытаний «Грейхаунда» прекрасно совпали с проведенными ранее модельными испытаниями.

После этого Фруд решил проверить справедливость хваленной формулы Ранкина, по которой получалось, например, что при скорости 14,3 узла (26,5 км/ч) сопротивление первого английского броненосного фрегата «Уорриор» должно составлять 34,5 т. Модельные испытания Фруда дали иной результат: при такой скорости сопротивление «Уорриора» составляло всего 22 т, то есть формула Ранкина давала результат, завышенный на 55%! В эти годы Фруды испытали немало моделей строящихся для английского флота кораблей. В числе первых иностранных заказчиков был российский флот, для которого в Торкее испытывались модели круглых броненосцев береговой обороны для Черного моря — знаменитых «поповок».

Разработанная Фрудом методика испытания моделей позволила ему уже к 1875 году установить ряд научных закономерностей, имевших важное значение для практического судостроения. Оказалось, что при малых скоростях сопротивление трения составляет 80—90% общего сопротивления, а при высоких его доля снижается до 45—60%. При сильном обрастании корпуса ракушками и водорослями эта зависимость проявляется резче и быстрее.

В эти же годы Фруд установил, что в основе механизма сопротивления формы, или, что то же, сопротивления давления, лежит образование вихрей в потоке жидкости за кормой движущегося тела, поэтому такое сопротивление правильнее называть вихревым. Для хорошо обтекаемых корпусов оно составляло, по исследованиям Фруда, около 8—10% от сопротивления трения и могло рассматриваться с ним заодно. В 1878 году Фруд испытал в бассейне модели кронштейнов, рулей и других кормовых устройств быстроходного крейсера «Ирис». Из этих испытаний он вывел важное для судостроителей правило: поскольку вихри могут возникать только за какими-нибудь частями корпуса — кромкой кронштейна, руля, ахтерштевня, дейдвуда, «тупая кормовая оконечность создает большее сопротивление, чем тупой нос». Так, наконец, получил свое физическое истолкование

факт, о котором не подозревал Ньютон и который озадачивал многих экспериментаторов в XVIII веке.

Этот вывод хорошо объясняет то пристальное внимание, которое с тех пор уделяют кораблестроители именно кормовой оконечности. Еще при испытании модели «Уорриора» Фруд специально исследовал взаимодействие винта и корпуса и установил ряд важных зависимостей. Скажем, винт меньшего диаметра менее эффективен, чем большой, но зато при нем корма обтекается лучше и ее сопротивление меньше, что компенсирует его недостатки. Или еще: в принципе два винта на судне эффективнее, чем один, но в сочетании с кормовой оконечностью «Уорриора», с расположением рулей и ахтерштевня один винт оказался на нем эффективнее, чем два.

Причину этого явления Фруд правильно усматривал в том, что винт, подсасывая воду из участков, прилегающих к кормовой оконечности, увеличивает здесь скорость водяных струй и, согласно закону Бернулли, создает разрежение — то самое «недавление», в котором некогда Дюбуа усматривал основную причину сопротивления. Таким образом, подсасывающее действие винта, как бы сводит на нет благоприятное действие плавных обводов кормы на сопротивление. В 1883 году, уже после смерти отца, Р. Фруд опубликовал результаты их совместных исследований, согласно которым приращение сопротивления вследствие работы винта в отдельных случаях достигало 40—50% общего сопротивления! Эти работы Фрудов, исследовавших влияние обводов кормы и размеров, расположения и числа винтов на гидродинамическое сопротивление корпуса, остаются в центре внимания кораблестроителей и в наши дни.

Убедившись, что модельные результаты дают надежное соответствие с натурой, Фруды провели ряд важных сравнительных исследований на моделях. Одной из первых работ такого рода стало испытание двух одинаковых по длине и водоизмещению моделей, одна из которых была сделана по «волновой теории» Скотта Рассела и имела острые нос и корму, а вторая, напротив, имела закругленные оконечности и полные обводы. И что же? В полном противоречии с тем, что представляется очевидным при поверхностном взгляде, остроносая модель оказалась выгоднее для малых скоростей, а тупоносая — для больших. Это наблюдение привычно для

современного специалиста: каплеобразное тело имеет меньшее сопротивление, если направлено к набегающему потоку не острым, а тупым, закругленным концом.

Далее, из теории трохоидаальных волн можно вычислить, что скоростям 10, 20, 30 узлов соответствуют следующие длины поперечных волн: 15, 64 и 140 м. Это значит, что для корабля длиной, скажем, 64 м скорость 20 узлов (37 км/ч) является «критической»: при такой скорости на длине корпуса укладывается всего одна поперечная волна, и нос и корма попадают на гребни. Если же эта скорость выше, то корма начинает опускаться во впадину поперечной волны, нос задирается вверх и корабль как будто все время взбирается на поднимаемую им волну. Волновое сопротивление при этом резко растет, и на его преодоление требуется колоссальная мощность. В этой простой зависимости скрыт секрет того, что корпуса быстроходных кораблей — эсминцев и крейсеров — всегда старались делать узкими и длинными.

На опытах с моделями Фруды показали, что удлинение корпуса не всегда выгодно и что длина влияет на сопротивление двояко. С одной стороны, оно несколько снижает коэффициент трения и волновое сопротивление, с другой — увеличивает трущуюся поверхность, а следовательно, и сопротивление трения. С этого момента был положен конец мечтам о единственной, пригодной для всех случаев жизни «форме наименьшего сопротивления», которую искали со времен Ньютона, и вопрос был сведен к поискам для каждой данной скорости такой формы, при которой сумма волнового, вихревого и фрикционного сопротивлений минимальна. Так, судно некоторого водоизмещения можно сделать длинным и узким — тогда его волновое и вихревое сопротивления будут малыми, а фрикционное — большим; если же судно короткое и широкое, зависимости будут обратные.

В результате достигнутой ясности понимания удалось повысить живучесть и безопасность некоторых английских кораблей. Так, стремясь повысить скорость, кораблестроители увеличивали длину корпуса и уменьшали при этом ширину, порой необоснованно снижая остойчивость — способность выпрямляться после крена — проектируемых кораблей. Во время разработки речных канонерских лодок типа «Мидуэй» Фруд с по-

мощью моделей показал, что без всякого ущерба для скорости их остойчивость может быть повышена за счет увеличения ширины с 8 до 10 м. Таким путем были улучшены и броненосец «Инфлексибл» и крейсера «Аякс» и «Ирис».

В 1885 году Р. Фруд провел интереснейшие испытания, которые могут служить блестящим подтверждением того, что интуиция, вкус и чувство пропорции, присущие великим инженерам, нередко позволяли им находить наивыгоднейшие решения там, где строгий математический расчет еще невозможен. Фруд решил сравнить кривые сопротивления знаменитого парохода «Грейт Истерн» с кривыми сопротивления более поздних судов — «Сити оф Ром», «Сервия» и «Галлия».

И что же?

Оказалось, что Брюнель и Скотт Рассел ухитрились в 1850-х годах спроектировать корпус, скоростные характеристики которого превосходили характеристики знаменитых пароходов 1880-х годов. Форма «Грейт Истерн» уступала только форме, разработанной в Торкее на базе систематических модельных испытаний.

Вторым исследованием такого рода были испытания модели так называемого «полисфенического корабля», изобретенного неким К. Рамусом. Это был длинный корабль, состоявший в профиле как бы из двух плоских клиньев, в месте стыка которых возникало подобие редана. По мысли изобретателя, на большой скорости клинообразные днища должны были выталкивать корпус из воды и он должен был после этого скользить на нескольких точках. Однако испытания У. Фруда в 1872 году не подтвердили этих ожиданий, и форма Рамуса была забракована. Ученого потом корили за такое заключение, в котором он будто бы не увидел важности принципа современных реданных глиссеров, но более поздние испытания показали, что Фруд оказался прав в оценке изобретения Рамуса.

Третье исследование — испытание трехпоплавковой модели, идея которой возникла у Фруда во время буксировок «полисфенического корабля». Эта модель оказалась тоже неудачной, но сама идея скольжения катера на трех точках была использована позднее.

Кроме решения ряда других практических задач «чародей из Торкея» положили начало большинству разработок, продолжение и завершение которых стало впо-

следствии содержанием деятельности опытовых бассейнов всего мира. Одним из наиболее важных направлений было начало систематических испытаний различных форм корпусов, в ходе которых У. Фруд пришел к заключению: с точки зрения снижения сопротивления выгодно придавать поперечным сечениям носовой части судна U-образную форму, а кормовой — V-образную. Вот почему таранные носы на броненосцах тех лет снижали их сопротивление и вот почему на первых торпедных катерах появилась резко обрубленная транцевая корма.

В пассажирском судостроении это наблюдение Фруда стало началом долгой эволюции, увенчавшейся в наши дни появлением носовых и кормовых бульбов.

Еще в 1873 году во время испытаний «Грейхаунда» У. Фруд придумал способ оценить силу воздушного сопротивления этого корабля — по его подсчетам, она оказалась равной 150 кг при скорости ветра 15 узлов. Проведя подобные измерения и на ряде других кораблей, он вывел простую формулу для оценки аэродинамического сопротивления надводной части корабля. После смерти отца, работая в Хасларе, Р. Фруд провел испытания на моделях в аэродинамической трубе и убедился, что точность формулы отца — 2,5%, в то время как точность модельных испытаний не на много выше — 2%!

Главным вкладом Фрудов в теорию корабля было, конечно, исследование сложных волновых процессов, связанных с движением судна. Именно они установили, что кроме носовых волн около корабельного корпуса возникает такая же, но менее ярко выраженная система кормовых волн, которые в отличие от носовых распространяются не по гладкой поверхности, а по поверхности, взволнованной носовой частью корабля. Ясно, что величина волнового сопротивления корпуса зависит от суммарной системы, образуемой наложением носовых и кормовых волн. Расходящиеся носовые волны при правильном прямолинейном движении корабля никогда не накладываются на кормовую систему. Такое наложение возможно только для носовых поперечных волн.

В зависимости от скорости судна и от длины его корпуса носовые поперечные волны, взаимодействуя с кормовыми, могут либо усиливаться, либо ослабляться. Все определяется тем, куда ляжет первый гребень носовой поперечной волны — на гребень или на впадину кормо-

вой. Таким образом, волновое сопротивление должно по мере увеличения скорости периодически возрастать и убывать, и на кривой сопротивления должны быть «горбы» и «провалы». И с помощью моделей Фруды действительно обнаружили подобные колебания.

Во время испытаний «Грейхаунда» У. Фруд столкнулся еще с одной важной и интересной проблемой. Действительное сопротивление этого корабля оказалось выше, чем вычисленное по испытаниям модели. Фруд заподозрил, что причины несоответствия — недостаточная глубина в месте испытания корабля. Он стал исследовать модели в бассейне с ложным дном, имитирующим мелководье, и достиг прекрасного соответствия модельных и натурных цифр. Но проблема оказалась гораздо сложнее и глубже, и это исследование Фруда положило начало разработкам, которые проводились в опытовых бассейнах в течение ряда последующих лет.

В 1900 году майор итальянского флота Дж. Рота — впоследствии известный гидродинамик и кораблестроитель — опубликовал статью, где подверг сомнению результаты самых достоверных натурных испытаний новейших миноносцев, которые были проведены на мерных милях Италии, Франции и Англии. В обоснование своего мнения он приводил любопытные данные собственных модельных экспериментов в опытовом бассейне в Специи. Они свидетельствовали: волновое сопротивление на мелкой воде гораздо больше, чем на глубокой. При скорости 18—26 узлов недобор скорости из-за малой глубины мог достигать 2—3 узлов, то есть 7—17%! То, с чем впервые при испытаниях «Грейхаунда» столкнулся У. Фруд, тридцать лет спустя стало встречаться повсеместно.

С резким увеличением волнового сопротивления на мелкой воде русские моряки столкнулись в 1885 году при испытаниях минного крейсера «Лейтенант Ильин». В 1894 году это явление на натурном миноносце изучал капитан датского флота А. Расмусен, а в 1904 году — немецкие кораблестроители. В 1902—1905 годах обширные натурные испытания миноносцев типа «Ривер» затеял английский предприниматель Г. Ярроу, выводы которого были подтверждены модельными экспериментами в опытовом бассейне Северо-Германского Ллойда в Бремерхафене. И в результате такой интенсивной исследовательской деятельности было сделано одно из самых неочи-

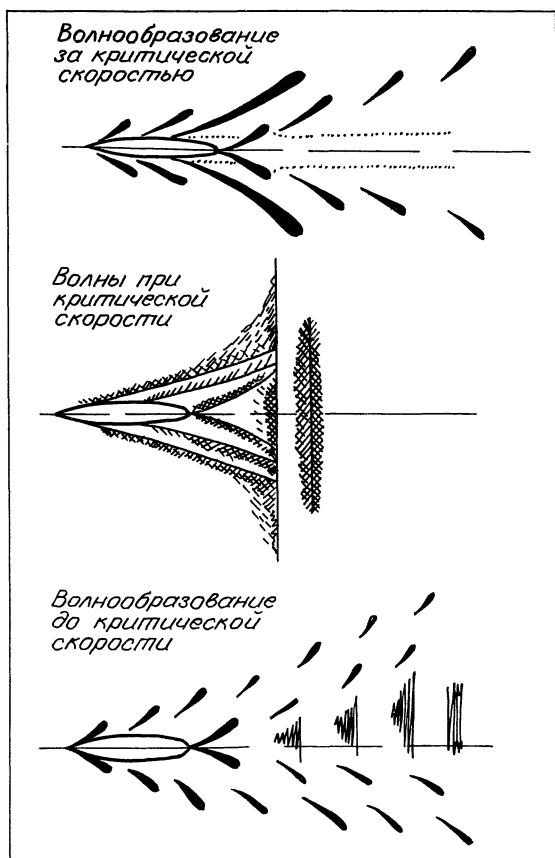


Рис. 34. Системы волн, образующихся за корпусом корабля на мелководье. При скоростях, меньших критической для данной глубины, возникают обычные носовые и кормовые расходящиеся волны и поперечные волны (внизу). При достижении критической скорости за кормой движется одна огромная поперечная волна, сопротивление корпуса резко возрастает (средняя схема). Превысив критическую скорость, корабль движется по мелководью легче, чем по глубокой воде: поперечные волны исчезают и остаются только носовые и кормовые расходящиеся волны (верхняя схема)

данных открытий в области корабельной гидродинамики.

Оказалось, что при движении кораблей на мелководье потокам, обтекающим корпус, труднее проходить между днищем судна и дном моря, поэтому они «выжимаются» из этого стесненного пространства и, обтекая корпус вдоль бортов, увеличивают здесь скорость. В результате такого повышения скоростей возрастают перепады давления, и судно на мелководье проявляет большую склонность к волнообразованию, чем на глубокой воде. Причем чем меньше глубина, тем резче и раньше нарастает сопротивление. Но оказалось, что на кривой сопротивления для мелкой воды тоже есть ярко выраженный «горб»: при некоторой критической скорости корабль приобретает ненормально высокое сопротивление, но стоит ему превзойти ее — и сопротивление быстро уменьшается. Причем все эти изменения сопротивления сопровождаются весьма эффектными метаморфозами волновой системы, порождаемой судном при переходе на мелкую воду.

Когда оно идет по глубокой воде, за ним образуются носовые и кормовые расходящиеся и поперечные волны. Но вот глубина начинает уменьшаться, дно все сильнее и сильнее влияет на образование волн: они становятся при неизменной скорости хода все длиннее, пока, наконец, при некоторой критической глубине их длина не станет «бесконечной». В этот момент за кормой возникает одна огромная поперечная изолированная волна...

Если после этого корабль переходит на еще меньшую глубину, то он попадает в условия, где поперечные волны вообще не могут существовать. Изолированная волна быстро отстает и остаются только носовые и кормовые расходящиеся волны, и сопротивление становится ниже, чем на глубокой воде! Чтобы при всех этих переменах сохранить скорость корабля постоянной, командир должен сначала увеличивать мощность машин, которая достигает максимума при возникновении одиночной волны. А после того как она исчезнет, мощность машин надо уменьшить. Так, спустя несколько десятков лет быстросходные миноносцы на мелкой воде демонстрировали морякам эффект переносной волны, с которым некогда Скотт Рассел столкнулся на судоходных каналах... Ведь соотношение между критической скоростью и глубиной для мелкой воды оказалось точно таким же, как для пе-

реносной волны на каналах: скорость эта пропорциональна корню квадратному из глубины.

Это замечательное открытие имело важное практическое значение. Оно показало, что для каждого корабля существует ряд не зависящих от размеров судна критических глубин и скоростей, при которых сопротивление аномально велико. В опытах Ярроу, например, для миноносца в 600 т наибольшая мощность требовалась при скорости 19 узлов на глубине 5,8 м. Но, преодолев критическую скорость, корабль двигался дальше с пониженным сопротивлением, расходуя мощность машин только на преодоление трения и образование расходящихся волн.

Это открытие навело академика А. Н. Крылова на мысль рассчитать критические скорости для типовых кораблей флота и нанести на генеральные карты Балтийского моря изобаты — линии постоянной глубины, соответствующие этим скоростям. «Изучив такую карту и имея ее перед собой, — писал академик, — командир или старший штурман корабля могли бы выбирать курсы и скорости своего корабля так, чтобы не причинять вреда береговому сооружению. Вместе с тем им не пришлось бы удивляться внезапным падениям ходкости корабля и приписывать неведомым причинам это естественное и неизбежное явление»...

Хотя Фрудам не удалось решить полностью задачи сопротивления, хотя их метод был приложим лишь к сравнительно хорошо обтекаемым корабельным формам и совершенно не годился для оценки сопротивления простейших тел вроде шара или цилиндра, их вклад в теорию корабля неоценим: они устранили главную трудность в проектировании пароходов. И высшим признанием их заслуг можно считать повсеместное распространение опытовых бассейнов.

Первый бассейн в Торкее, построенный на арендованной земле, просуществовал всего 14 лет: когда истек срок аренды земельного участка, сооружение было разобрано, канал засыпан и земля возвращена владельцу в ее первоизданном виде, а оборудование было перевезено в новый адмиралтейский бассейн в Хасларе. Этот бассейн стал третьим в мире, так как второй частный бассейн фирма «Денни» соорудила в Думбартоне в 1884 году. Несмотря на доказанную важность этих сооружений, до конца XIX века во всем мире было построено всего пять

бассейнов, в числе которых был и Петербургский, сооруженный по инициативе Д. И. Менделеева.

Результаты деятельности этих бассейнов сломали лед недоверия. В 1920 году в одной только Англии были испытаны модели 66% всех вновь строившихся торговых судов. Снижение сопротивления в среднем составило 2%, а для 23 судов достигло 8,5%. Только на этих 23 судах, благодаря модельным испытаниям в бассейнах, удалось экономить в год 15 тыс. т угля! Вот почему в первое 40-летие XX века число опытовых бассейнов в мире увеличивается до 50, из которых на долю Англии приходилось шесть.

Но и этим не исчерпывается вклад Фрудов в развитие техники. Замечательные результаты, получаемые исследователями в опытовых бассейнах, неизменно оказывали духовную поддержку тем энтузиастам, которые мечтали о покорении воздушного пространства. И если модельные испытания в кораблестроении появились тогда, когда история мореплавания насчитывала уже не одну тысячу лет, то авиация своим зарождением обязана моделям, ибо задолго до того, как в воздух поднялся первый аэроплан, сотни, тысячи маленьких моделей крыльев были испытаны в аэродинамических трубах. А трубы никогда не появились бы на свет, если бы в опытовых бассейнах не была доказана замечательная эффективность модельных испытаний.

Глава V. РАЗРЕШЕНИЕ ГИДРОАЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАДОКСОВ

В

о время русско-турецкой войны 1876—1878 годов было предложено множество проектов применения воздухоплавания в военных целях. Среди проектов летательных аппаратов мы видим паролеты А. Можайского и Ф. дю Тампля, привязной электролет для разведки А. Лодыгина, множество машущих мускулолетов, аэростатов и дирижаблей. Русское военное и морское ведомства обратились к знаменитому химику и ученому-универсалу Д. И. Менделееву с просьбой изучить вопрос, разобраться в нем и дать необходимые рекомендации.

Скажем прямо, Менделеев не очень-то верил в возможность успеха аппаратов тяжелее воздуха. «Аэростат, — писал он, — надежнее, ближе к цели, чем птицеподобные летательные машины». Тем не менее от его внимания не ускользнула важность экспериментов, проведенных на первой в мире аэродинамической трубе...

Ньютоново заблуждение и его преодоление

Английский инженер-строитель Ф. Вейнхэм (1824—1908) заинтересовался полетом птиц во время путешествия по Нилу. Внимательно рассматривая птичьи крылья, он напал на мысль, что подъемная сила на быстро движущейся пластине достигает максимума близ передней кромки, поэтому узкие длинные крылья должны быть эффективнее широких и коротких. Вторая мысль Вейнхэма состояла в том, что подъемная сила изогнутых птичьих крыльев должна быть больше, чем у плоских пластин.

Будучи членом Аэронавтического общества Великобритании, основанного в 1866 году, Вейнхэм сделал доклад о своих наблюдениях на одном из первых же заседаний. Приятелю Вейнхэма, почетному секретарю Общест-



Рис. 35. Русский химик Д. И. Менделеев (1834—1907 г.) — знаток истории учения о сопротивлении жидкостей и инициатор постройки первого русского опытового бассейна в Петербурге

ва Ф. Брири не стоило большого труда убедить его заняться аэродинамическими исследованиями. И в 1871 году Вейнхэм соорудил первую в мире аэродинамическую трубу, приладив цилиндрический кожух к большой воздуходувной машине на заводе Пенна в Гринвиче. В ней и были для начала продуты плоские пластины под разными углами атаки. Вейнхэм установил, что у пластины в квадратный фут (0,0915 кв. м.) при наклоне 15° сила сопротивления составляет 0,22 кг, а подъемная — в четыре раза больше — 0,88 кг. При 45° эти силы сравниваются и составляют по 1,25 кг. Соответствующие данные были получены и для других углов атаки. Но, увы, на этом эксперименты закончились: когда Брири стал настаивать на исследовании «колеблющегося крыла» — подобия ковра, из которого вытряхивают пыль, — выведенный из себя этими бреднями Вейнхэм вышел из членов Аэронавтического общества.

Историки считают, что вторым деянием Брири, нанесящим ущерб развитию аэронавтики, было упорное противодействие опубликованию в Трудах Общества трактата «О воздушном полете», написанного еще в 1809 году Дж. Кейли (1773—1857), тем самым, о котором много лет спустя один из создателей первых самолетов О. Райт сказал: «Кейли о принципах аэронавтики знал больше, чем кто-либо из его предшественников, и столько же, сколько любой из его последователей».

Еще в десятилетнем возрасте Кейли был потрясен по-

летами первых монгольфьеров, и свою жизнь он посвятил изучению полета птиц, запускам воздушных змеев, постройке летающих моделей. Одним из первых он стянул с себя гипнотическое завораживающее действие машущего полета птиц и правильно поставил основную задачу в создании аппаратов тяжелее воздуха: «Вся проблема состоит в том, чтобы создать поверхность, могущую удержать заданный груз при приложении силы, способной преодолеть сопротивление воздуха». Так впервые были связаны воедино две главные характеристики несущей поверхности — подъемная сила и лобовое сопротивление.

Во времена Кейли сама возможность существования такой поверхности считалась весьма проблематичной. Ведь тогда, в первые годы XIX века, все еще господствовало ньютоново мнение о том, что подъемная сила, действующая на плоскую пластину со стороны воздушного потока, пропорциональна квадрату синуса угла атаки. Эта величина ничтожна при малых углах, и для получения нужной грузоподъемности требуются крылья огромной площади. Если же увеличить наклон, подъемная сила возрастет, но зато резко увеличится и лобовое сопротивление, для преодоления которого понадобится более мощный тяжелый двигатель. Таким образом, конструктор оказался в тупике. С одной стороны — аппарат с приемлемым по весу и мощности мотором, но с огромными и тяжелыми несущими поверхностями, с другой — аппарат с приемлемыми размерами крыльев, но с чрезмерно мощным и тяжелым мотором.

Кейли «спасло» то, что в его времена вообще не было подходящих моторов, и он сосредоточился на постройке планеров, где главное внимание ему пришлось уделить получению достаточной подъемной силы. В 1804 году на ротативной машине собственной конструкции Кейли испытал множество пластин под разными углами атаки и убедился, что закон квадратов синусов не верен и что подъемная сила пропорциональна примерно синусу угла атаки. Такая зависимость гораздо благоприятнее для конструктора, и в 1853 году Кейли построил планер в натуральную величину с площадью крыльев около 30 кв. м, совершивший несколько удачных беспилотных полетов.

В трактате «О воздушном полете» Кейли первым высказал две важные догадки. Он считал, что подъемная сила крыла создается не столько

за счет подпора воздуха снизу, сколько за счет разрежения сверху; и что изогнутые поверхности должны давать большую подъемную силу, чем плоские. Вейнхэму, как мы знаем, не пришлось проверить эти догадки экспериментом. Эта работа выпала на долю нескольких исследователей, занявшихся аэродинамическими опытами в последние два десятилетия XIX века...

В 1883 году—через двенадцать лет после Вейнхэма—вторую в истории науки аэродинамическую трубу оригинальной конструкции построил русский инженер С. Неждановский: в ней модель обдувалась не воздухом, а потоком газов, получаемых в генераторе при сгорании пороха. А через год англичанин Г. Филлипс (1845—1912) начинает свои знаменитые эксперименты с аэродинамической трубой, в которой воздушный поток создавался инжектирующим действием струи водяного пара, выпускаемого через расширяющееся сопло за измерительным участком. В 1894 году в Дании появляется аэродинамическая труба Ирмингера и Фогта, а три года спустя — Ла Кура. В 1896 году в Англии трубу строит знаменитый изобретатель пулемета Х. Максим (1840—1916), а во Франции — крупный аэродинамик Ш. Ренар (1847—1905). В 1897 году приступает к экспериментам с первой в России трубой К. Э. Циолковский (1857—1935), а в 1902 году в России начинает работать вторая установка, сооруженная под руководством Н. Е. Жуковского в Московском университете. В эти годы было немало сооружено и ротативных машин, среди которых самой крупной считалась машина известного американского астронома С. Лэнгли (1834—1906).

Интенсивная исследовательская работа, проведенная на этих многочисленных установках, принесла богатые научные результаты. Так, Филлипс, начав обдувать воздушным потоком изогнутые наподобие птичьих крыльев пластины, сразу же подтвердил догадки Кейли и Вейнхэма: изогнутая поверхность давала гораздо большую подъемную силу, чем плоская. Этот вывод подтвердили и эксперименты Лэнгли, машина которого позволяла испытывать модели при скоростях, достигавших 110 км/ч. Благодаря такому расширению скоростного диапазона американцу удалось сформулировать так называемый «закон Лэнгли»: чем быстрее движется пластина, тем меньшая мощность нужна для поддержания ее в воздухе. К 1891 году Лэнгли пришел к выводу: «Можно построить

двигатели, которые сообщают наклонным поверхностям такую скорость, что они смогут оторваться от земли, двигаться в воздухе с большой скоростью и нести не только собственный вес, но и дополнительный груз».

Хотя патент на изогнутые профили крыльев получил Филлипс, первым экспериментально этот эффект обнаружил не он, а немецкий инженер Отто Лилиенталь (1848—1896). С 1866 года занимаясь на ротативной машине исследованием обтекания пластин, он уже в 1874 году экспериментально подтвердил догадку Кейли и Вейнхэма о преимуществе изогнутой поверхности над плоской и сделал важное открытие: на изогнутой поверхности подъемная сила возникает даже тогда, когда угол атаки равен нулю, то есть когда передняя и задняя кромки крыла находятся на одной высоте!

Отто Лилиенталь сделал очень важный шаг от исследования моделей к практическим полетам, в которых к середине 1890-х годов он был признанным лидером. Кроме него, в те годы постройкой и испытанием планеров занималось немало энтузиастов в других странах: Пильчер в Англии, Фербер во Франции, Вольфмюллер в Германии, Шанют в США. Особенно важных результатов в изучении устойчивости полета достиг О. Шанют (1832—1910). В июле 1896 года он пришел к убеждению, что аппараты Лилиенталья небезопасны, а спустя всего месяц неожиданный порыв ветра резко накренил планер, на котором Отто совершал очередной полет, и, не сумев выровнять его, изобретатель ударился о землю и умер от перелома позвоночника...

При изучении ранней истории авиации вызывает невольное удивление тот факт, что Отто Лилиенталь, продвинувшись в этой области дальше всех, почему-то не сделал следующего шага, подсказываемого всей логикой развития аэронавтики, — не попытался поставить на свой планер мотор с пропеллером. Некоторый свет на эту загадку проливает «теория», опубликованная через несколько лет после гибели Отто его братом Густавом Лилиенталем (1849—1933). Оказывается, оба брата замыслили создать своеобразный «вечный двигатель» и много лет искали способ получения «отрицательного сопротивления», надеясь подобрать такой профиль крыла, при котором аппарат мог бы лететь, не нуждаясь в тяге.

Американцы братья Уилбер (1867—1912) и Орвилл (1871—1948) Райт заинтересовались полетами

в 1899 году. Они обратились в Смитсонианский институт за консультацией и получили оттуда подборку работ по аэронавтике О. Лилиенталя, С. Лэнгли, Х. Максима, А. Белла и других. Но когда они попытались по этим источникам построить планер, то он оказался крайне неудачным, и это побудило братьев превратить ящик из-под крахмала в самодельную аэродинамическую трубу и самостоятельно испытать в ней около 200 различных профилей крыла. Вопреки высказываемому иногда мнению Райты были не просто ловкими комбинаторами уже известного, они показали себя проницательными исследователями, сделав несколько важных аэродинамических открытий. Например, они убедились, что передние кромки крыльев не должны быть острыми, как тогда считалось, и что сильно изогнутые профили не эффективны.

Консультации у Шанюта помогли Райтам создать устойчивый в полете планер и отработать систему управления им.

После устойчивых полетов братьев Райт в декабре 1903 года в европейских странах начинают подниматься в воздух все новые и новые летательные аппараты, примерно в той последовательности, в какой эти страны за несколько лет до этого строили аэродинамические трубы. 12 сентября 1906 года взлетает первый на Европейском континенте аэроплан датчанина Элленхамера. Спустя полтора месяца поднимает в воздух первый во Франции аппарат Сантос-Дюмон. В том же году успешно стартует англичанин А. Ро. В 1908 году свои аппараты поднимают в воздух Дюфе в Швейцарии, Этрих-Вельс в Австрии, Граде — в Германии и Миллер — в Италии.

Для российской авиации поистине триумфальным стал 1910 год. 21 марта в Одессе впервые в нашей стране русский пилот М. Ефимов совершил демонстрационный полет, правда пока еще на французской машине. 23 мая в Киеве полноценный, но официально не зарегистрированный полет на несколько десятков метров в длину совершил самолет отечественной конструкции А. Кудашева, а на следующий день на Гатчинском аэродроме в Петербурге комиссия Всероссийского аэроклуба официально зарегистрировала первый полет по прямой на 200 м аэроплана русской конструкции «Гаккель III».

Однако для развития мировой авиации гораздо важнее этих полетов был другой вклад России в аэродинами-

ку: именно здесь и именно к 1910 году была, наконец, раскрыта тайна подъемной силы, и сделали это два великих русских ученых — Н. Е. Жуковский и С. А. Чаплыгин.

Сила, рожденная циркуляцией

В 1852 году к профессору Берлинского университета Г. Магнусу (1802—1870) с просьбой дать объяснение странному парадоксу обратились прусские артиллеристы. Иногда, даже в безветренную погоду, пушечные ядра непредсказуемо отклонялись в правую или в левую сторону от вертикальной плоскости стрельбы. Для консультанта артиллерийской академии Магнуса не было секретом это явление: его описал еще в 1742 году Б. Робинс. Он же предположил, что секрет странного поведения ядер в том, что при вылете из ствола они могут случайно получить вращение. Там, где скорость поверхности вращающегося ядра совпадает с направлением скорости обтекающего ядро воздушного потока, плотность воздуха уменьшается, а с противоположной стороны — увеличивается. Вследствие этого ядро должно испытывать действие поперечной силы.

Магнус провел серию испытаний с вращающимся в потоке бронзовым цилиндром и обнаружил, что он действительно смещается поперек потока в ту сторону, где окружная скорость цилиндра совпадает со скоростью потока. Объяснив явление качественно, Магнус не сумел измерить поперечную силу и тем более вывести формулу для ее вычисления. Но именно его эксперимент положил начало той цепи открытий, которые со временем привели к блестящему обобщению: поперечная сила, возникающая на вращающемся в полете ядре, имеет точно такое же происхождение, как и подъемная сила птичьего и самолетного крыла!

Первый шаг в освоении этой фундаментальной истины сделал немецкий ученый Г. Гельмгольц (1821—1894), о котором говорили, что он стал последним из врачей, внесшим важный вклад в развитие физико-математических наук. Получив медицинское образование и будучи профессиональным медиком, он почти тридцать лет пытался приложить физику и математику к физиологическим исследованиям. Лишь в 1871 году Гельмгольц стал профессором физики Берлинского университета, а в 1888 году — директором Государственного физико-техниче-

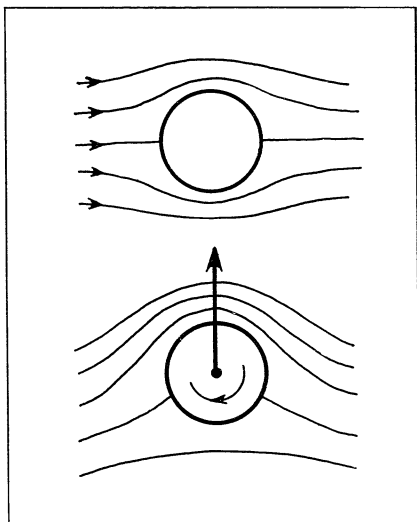


Рис. 36 Схема возникновения поперечной силы, действующей на движущийся в воздухе вращающийся цилиндр или шар

ского института в Берлине — эти посты достойно увенчали его научные заслуги. Именно Гельмгольц украсил прекрасными открытиями электромагнетизм, термодинамику, оптику, акустику, а также физиологию зрения, слуха, нервных и мышечных систем, изобрел ряд важных приборов.

В 1858 году вышла в свет математическая работа Гельмгольца «Об интегралах уравнений, соответствующих вихревым движениям», впоследствии давшая повод великому русскому аэромеханику Н. Е. Жуковскому утверждать, что «современная гидродинамика своим развитием обязана главным образом Гельмгольцу».

Какой же вклад немецкого ученого в гидромеханику так высоко оценивал Жуковский?

Чтобы разобраться в этом, рассмотрим движение элемента идеальной жидкости — как бы «жидкого кубика» — в потоке. Оно может складываться всего из трех движений — поступательного (переноса, перемещения), вращательного и деформационного. Поток, в котором вращение равно нулю и «кубик» только перемещается и деформируется, называется потенциальным или безвихревым. При наличии всех трех видов движения создается вращательный или вихревой поток.

Простейший вид потенциального потока — параллель-

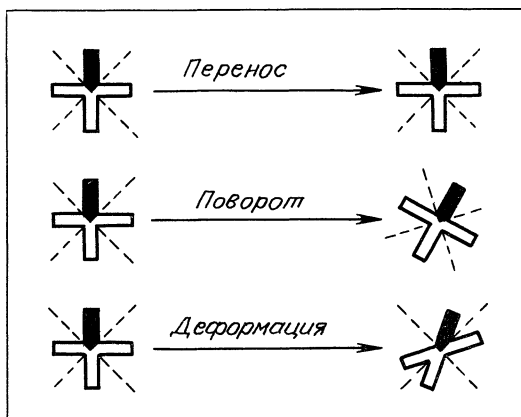


Рис. 37. Три возможных вида движения жидкостного элемента — перенос, поворот и деформация

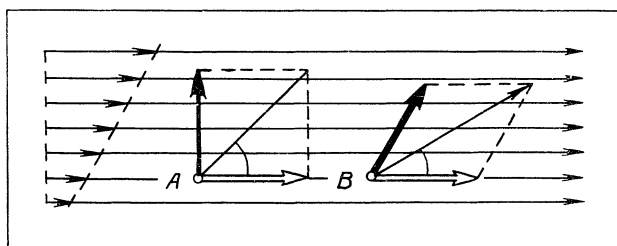


Рис. 38. Простейший случай вихревого движения: хотя скорости всех жидкостных элементов параллельны, поток вращательный, ибо биссектриса угла между стрелками поворачивается

ный поток с постоянной скоростью, где нет ни деформации, ни вращения, а все «кубики» просто перемещаются параллельно, как автомобили на магистрали. Поток, в котором скорости всех элементов параллельны, но не одинаковы в поперечном сечении, будет не потенциальным, а вращательным, хотя вращения в общепринятом смысле слова в таком потоке нет.

В самом деле, если с элементом жидкости в параллельном потоке связать две стрелки — одну, направлен-

ную вдоль потока, а другую — перпендикулярно к нему, то вследствие неравномерности поля скоростей при перемещении из точки А в точку В элемент исказится. Стрелка, направленная вдоль потока, сохранит свое положение, а перпендикулярная повернется по потоку на некоторый угол. При этом произойдет поворот не только перпендикулярной стрелки, но и биссектрисы угла между ними, а поскольку именно по ее повороту следует судить о вращении элемента, то нетрудно убедиться в том, что рассматриваемый нами поток одновременно и поступательный, и деформационный, и вращательный. Таким образом, вопреки обыденному представлению, согласно которому вихрь — это нечто бешено вращающееся, данный параллельный поток, в котором, однако, вращается каждый элемент жидкости, — это простейший случай вихревого движения.

Очевидно, что так называемый циркуляционный поток, в котором элементы жидкости движутся по круговым линиям тока наподобие частиц вращающегося твердого тела, — вихревой: здесь нет деформации элементов, но все они вращаются с одинаковой угловой скоростью вокруг одной оси. Возникает вопрос, можно ли осуществить течение, в котором линии тока были бы круговыми, а поток все-таки оставался бы безвихревым, таким, в котором элементы жидкости не вращались бы? Гельмгольц ответил на этот вопрос утвердительно и в своей статье 1858 года разработал теорию таких течений в идеальной жидкости. В чем же ее суть?

Поскольку биссектриса между двумя стрелками в безвихревом, потенциальном течении должна сохранять свое первоначальное положение, то скорости движущихся по окружностям жидкостных элементов обязательно должны уменьшаться по мере удаления от центра вдоль радиуса. Подсчеты показывают, что в этом случае должно оставаться постоянным произведение скорости элемента на радиус, или, что то же самое, должна сохраняться постоянной циркуляция: произведение скорости элемента на периметр его кругового движения.

Это условие резко нарушается в центре кругового движения, где скорость должна стать бесконечной. Поэтому Гельмгольц предположил существование в центре жидкостного ядра цилиндрического столбика, в котором поток не потенциален и который вращается как сплошное твердое тело. Этот столбик Гельмгольц назвал вих-

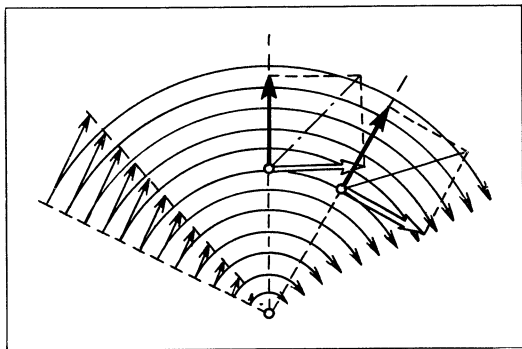


Рис. 39. Пример безвихревого движения с круговыми линиями тока

ревым шнуром, а совокупность вихревого шнура и циркуляционного потока, вращающегося вокруг него с убывающими к периферии скоростями, — вихрем...

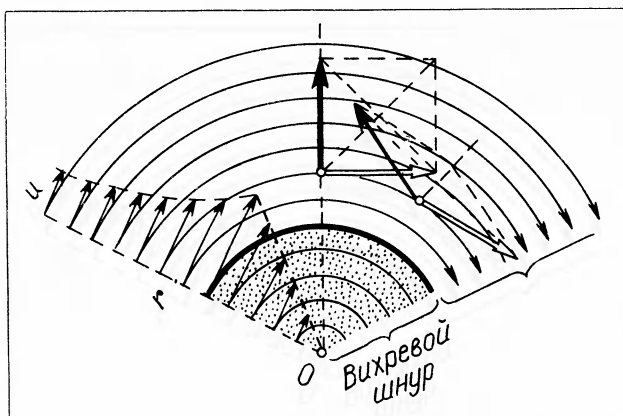
Этот новый геометрический образ известный английский математик и физик Дж. Стретт (1842—1919), получивший титул лорда Рэлей после смерти отца барона Рэлей и удостоенный Нобелевской премии за открытие аргона, успешно приложил к теоретическому исследованию движения вращающегося цилиндра в потоке жидкости. Он заметил, что потенциальное течение по круговым линиям тока может существовать не только вокруг вихревого шнура, но и вокруг твердого цилиндра. В 1878 году Рэлей опубликовал свое исследование, в котором показал, как при наложении потенциального циркуляционного движения на потенциальный параллельный поток в идеальной жидкости создается действующая на цилиндр магнусова сила, перпендикулярная к направлению этого потока, та самая, которая отклоняла вращающееся ядро. Но какое проникновение в суть дела, какое воображение и какая мощная математическая техника потребовались выдающемуся русскому аэромеханику Н. Е. Жуковскому, чтобы увидеть: один и тот же механизм порождает подъемную силу и на вращающемся цилиндре, и на крыле аэроплана!

Николай Егорович Жуковский принадлежал к той новой школе математиков и механиков, которая появилась в Европе в качестве своеобразной реакции на увле-



Рис. 40. Немецкий физик и медик Г. Гельмгольц (1821—1894)

Рис. 41 Схема вихря, предложенная Гельмгольцем. В центре вихря — вихревой шнур, вращающийся как целое, сплошное тело, а на периферии — циркуляционный поток



чения аналитической школы конца XVIII — начала XIX века. Если аналитики в первую очередь брались не за самые важные для практики задачи, а за те, которые быстрее всего поддавались решению строгими математическими методами, если для них нахождение траекторий и сил свелось к проблеме интегрируемости дифференциальных уравнений, то математики новой школы подходили к делу иначе.

Их не устраивало только открытие новых математических закономерностей. Они стремились к широкому внедрению новых методов в живую практику инженерной и научной работы.

В своих выступлениях Жуковский приводил примеры того, как аналитическое решение, не оказав никакого влияния на развитие науки, не раз было погребено в массе безликих формул и символов. И тогда другим ученым приходилось переоткрывать их заново, доводить до всеобщего понимания и таким образом превращать в действительное и действенное орудие познания. Как иллюстрацию этой мысли Жуковский часто приводил судьбу гельмгольцевой теории вихрей.

«Гельмгольц, — говорил он в 1894 году на заседании Московского математического общества, — дает геометрическую интерпретацию интегралов гидродинамики, которые 20 годами раньше были найдены Коши и оставались без применения. Он развивает эту интерпретацию в учение о движении вихрей, которое легло в основание современной гидродинамики». Геометрическое толкование, считал Жуковский, не просто объясняет смысл аналитически полученных результатов, но часто направляет анализ на верный путь. Вот почему выдающийся русский ученый и педагог такое большое внимание уделял ясности, наглядности математических образов. «Математическая истина, — говорил он, — только тогда должна считаться вполне обработанной, когда она может быть объяснена всякому из публики, желающему ее усвоить. Я думаю, что если возможно приближение к этому идеалу, то только со стороны геометрического толкования или моделирования. Моделирование стоит рядом с геометрическим толкованием и представляет еще высшую степень наглядности».

Эти слова, произнесенные в 1894 году, прекрасно объясняют, почему именно Жуковский стал инициатором аэродинамических экспериментов в России и почему именно в Московском университете, где он был профессором, были начаты первые в стране систематические аэродинамические модельные испытания. Сначала они велись на летающих моделях, потом — на огромной машине Аттвуда, установленной на университетской лестнице, а с 1902 года на первой в России трубе всасывающего типа с квадратным сечением 75×75 см.



Рис. 42. Русский гидроаэромеханик Д. П. Рябушинский (1882—1962)

Весной 1904 года богатый московский купец Д. П. Рябушинский* — выпускник Московской практической академии — обратился к своему недавнему учителю Н. Е. Жуковскому с предложением построить самолет: как раз тогда до России дошли сведения об успешных полетах братьев Райт. Профессор дал ученику более дельный совет — создать хорошо оснащенную современным оборудованием аэродинамическую лабораторию. Такое учреждение было создано уже осенью 1904 года в Кучине под Москвой, где на средства Рябушинского было выстроено прекрасное здание и смонтирована большая аэродинамическая труба — третья в России после труб Циолковского и Жуковского. И в центре внимания кучинских исследований сразу же становится измерение подъемной силы, которая изучается как на воздушных змеях, так и на мощной аэродинамической трубе.

* Д. П. Рябушинский был весьма одаренным ученым. В Кучине он работал над теорией подобия, ламинарными и турбулентными потоками и теорией конформных отображений. В 1919 году он эмигрировал во Францию и в лаборатории авиационного министерства занимался проблемами кавитации, волновых движений и измерительных приборов. Рябушинскому, между прочим, принадлежит изобретение анемометра с нагретой проволокой (1909 год) и реактивного ружья типа «базука» (1916 год).

По всей видимости, именно здесь осенью 1904 года Жуковскому пришла в голову мысль о том, что в циркуляции таится разгадка подъемной силы крыла.

«Перед Жуковским стояла сложная задача — придать своим соображениям количественную форму и дать им теоретическое объяснение, — писал в 1948 году известный советский аэродинамик В. В. Голубев. — Трудность этой работы, вероятно, и привела к тому, что гениальная мысль, возникшая интуитивно в уме Жуковского и представшая ему, вероятно, сразу в полной ясности, получила четкое оформление только через два года в опубликованном им классическом мемуаре «О присоединенных вихрях», который в области гидромеханики открывал совершенно новую эру и поэтому может быть поставлен рядом с классическими работами Бернулли, Эйлера и Лагранжа».

В основу своего исследования Жуковский положил двумерную картину движения, в которой тело постоянного сечения считается либо бесконечно длинным, либо скользящим без трения в пространстве между двумя параллельными стенками, заполненном идеальной жидкостью. Такое предположение снимает трудности, которые возникают при учете перетекания жидкости на концах движущегося тела.

Рассмотрев движение вращающегося цилиндра, Жуковский показал, что возникающая на нем подъемная сила равна произведению скорости потока, плотности жидкости и величине циркуляции. Причем для вращающегося цилиндра вычислить эту важную величину не составляет большого труда: она равна произведению периметра на окружную скорость. Если же движется не цилиндр, а профиль произвольной формы, вокруг которого установилось тем или иным путем циркуляционное течение, то для него циркуляция равна произведению периметра контура на среднюю из всех проекций скорости на сам контур.

Но возникает вопрос: если движется не вращающийся цилиндр, а неподвижный крыловой профиль, то откуда же здесь берется циркуляция? Как она появляется?

Искушенный в механических тонкостях исследователь Жуковский понимал, как важно иногда рассмотреть не уже установившееся движение, а начальные фазы его возникновения, в которых нередко оказываются скрытыми все последующие трудности.

Жуковский показал, что есть известное сходство между нарастанием сопротивления при разгоне корабля и нарастанием подъемной силы при разгоне крыла бесконечного размаха. Еще Гельмгольцу удалось установить, что если первоначально в потоке идеальной жидкости нет вихрей, то породить их можно только с помощью острой кромки, по обе стороны которой скорости жидкости резко различаются. Срываясь с такой кромки, разноскоростные струи жидкости образуют разрыв сплошности, состоящий из последовательности множества завихрений, — своеобразную вихревую пелену.

Когда крыловой профиль с острой задней кромкой приводится в движение, то в первые мгновения ускоренный на выгнутой верхней поверхности поток стремится обогнуть острою кромку, но поскольку при этом должны возникнуть бесконечно большие скорости, то за острой кромкой рождается вихрь, который, сходя с крыла, тянет за собой вихревую пелену. Согласно принципам механики вращение в механической системе не может появиться без реакции, без равного, но противоположного ему противодействия. Поэтому если разгон крыла порождает вихрь, то в остальной массе жидкости должно появиться вращение в противоположном направлении. Эта противоположная сходящему вихрю реакция и есть присоединенный к крылу вихрь, создающий циркуляцию скорости вокруг крылового профиля.

По мере того, как крыло, ускоряясь, уходит все дальше и дальше, так называемый начальный вихрь остается на месте, а «стягиваемая» им с крыла вихревая пелена все больше и больше увеличивает возникшую вокруг профиля циркуляцию. Но с нарастанием циркуляции скорости жидкости по обе стороны острой задней кромки постепенно выравниваются, и в тот момент, когда они становятся равными друг другу, вокруг профиля устанавливается максимальная циркуляция и на нем достигается максимальная подъемная сила.

«Принимая поток горизонтальным, набегающим на тело справа налево, а вращение вихря против стрелки часов, мы увидим, что скорости набегающей жидкости будут приподняты немного вверх, а скорости убегающей — будут опущены немного вниз, — писал Жуковский. — От обеих причин на тело будет действовать сила снизу вверх...»

Открытие Жуковского радикальным образом измени-

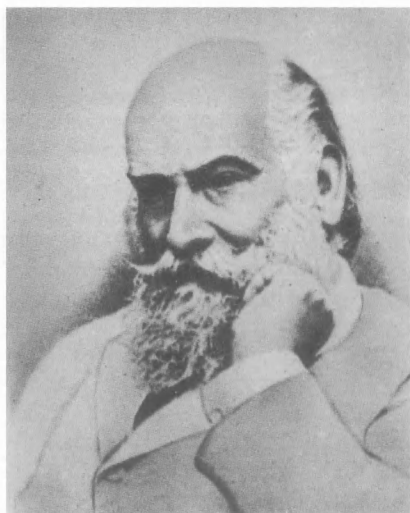
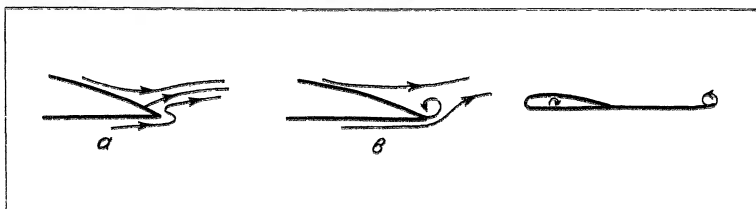


Рис. 43. Русский аэродинамик Н. Е. Жуковский (1847—1921), создавший теорию крыла бесконечного размаха

Рис. 44. Схема образования циркуляции скорости вокруг ускоряющегося крыла, необходимой для создания подъемной силы: *а* — начальная фаза; *в* — отрыв потока



ло все воззрения на физическую природу подъемной силы. Если со времен Ньютона бытовало интуитивное убеждение, что воздух подпирает наклонную плоскость и что аэроплан поддерживается воздухом снизу, то теперь стало ясно, что крыло присасывается к протекающим над ним струям воздуха и как бы подвешено к ним. Совсем иным оказался и порядок величины подъемной силы. Если, по Ньютону, получалось, что массы отклоняемого пластиной воздуха состоят только из частиц, непосредственно столкнувшихся с ней, то, по теории Жуковского, получалось нечто совсем иное: в создании подъемной силы принимают участие огромные массы воздуха, не прилегающего непосредственно к крылу. Теория Жуковского сулила авиации гораздо более оптимистичные перспективы, нежели теория Ньютона: вычисленные по Жуковскому значения подъемной силы в несколько десятков раз превосходили те, которые давала ньютонова теория.

Последовавшее за 1906 годом пятилетие можно смело назвать русским триумфом в аэромеханике, ибо все экспериментально открытые прежде аэродинамические эффекты нашли свое объяснение в работах Жуковского и его ученика Чаплыгина...

Русский аэродинамический триумф

В 1880 году, размышляя о будущем воздухоплавания, Д. И. Менделеев провидел ту великую роль, которую суждено было сыграть русским ученым в грядущем развитии мировой авиации. «У других много берегов водяного океана, — пророчески писал он. — У России их мало сравнительно с ее пространством, но зато она владеет обширнейшим против всех других образованных стран берегом еще свободного воздушного океана. Русским поэтому и сподручнее овладеть сим последним... Главную подготовку для овладения воздушным океаном, первое орудие борьбы, — составляет знание...» Вот почему именно накопление знаний, достижение ясности понимания физических процессов в аэродинамике стало главной целью московской аэродинамической школы, которая по обилию и богатству результатов заняла к середине 1910-х годов ведущее место в мире. А достичь такого первенства было не так-то просто.

На начало XX века приходится настоящий аэродинамический бум, и в ведущих странах мира один за другим создаются крупные исследовательские центры. В 1901 году возник Римский аэромеханический институт в США, возглавляемый профессором А. Цамом. В 1902—1903 годах учреждается Национальный аэронавтический институт в Риме, руководимый Л. Крокко. В 1903 году начинает работать аэродинамическое отделение Национальной физической лаборатории близ Лондона во главе с Т. Стентоном. Во Франции одна за другой учреждаются аэродинамические лаборатории А. Эйфеля и А. Рато (1909—1910), а также Сен-Сирская лаборатория. В Германии первая аэродинамическая школа сложилась вокруг Л. Прандтля в Геттингене в 1907—1908 годах, а позднее, в 1913 году, в Линденберге был построен аэронавтический институт Общества немецких инженеров во главе с Бендеманом. Наконец, в 1910—1911 годах крупные аэродинамические лаборатории основываются в Петербурге — в Институте путей сообщения по инициативе

профессора Н. А. Рынина и в Политехническом институте по инициативе профессора К. П. Боклевского.

Но несмотря на многочисленность всех этих лабораторий, исследования в большинстве из них носили сугубо утилитарный, прикладной характер, и одна только лаборатория Л. Прандтля достигла важных научных результатов, благодаря которым смогла соперничать с прославленной московской школой — Н. Е. Жуковским и С. А. Чаплыгиным и их учениками: Д. П. Рябушинским, Б. Н. Юрьевым, Г. Х. Сабининым, В. П. Ветчинкиным и другими.

После того как Жуковский установил, что подъемная сила равна произведению скорости потока, плотности жидкости и циркуляции, вся трудность ее вычисления была сведена к определению последнего сомножителя, величина которого существенно зависит от формы крыла и угла атаки. Именно этой проблемой и занялся С. А. Чаплыгин — будущий академик и первый среди советских ученых Герой Социалистического Труда.

Ученый ясно понял, что равенство скоростей жидкостных струй, сходящих с верхней и нижней поверхностей крыла около задней острой кромки, есть узловой пункт теории подъемной силы. Приложив это условие к профилю, представляющему собой часть поверхности кругового цилиндра, хорда которого расположена параллельно направлению потока, Чаплыгин приступил к рассмотрению важных для практики случаев. И что же оказалось?

Прежде всего подтвердилось открытие, сделанное некогда Лилиенталем и крепко озадачившее его: изогнутые поверхности дают подъемную силу даже при нулевом угле атаки. Но этого мало. Оказалось, что подъемная сила на таком профиле зависит только от стрелки дуги и совершенно не зависит от ширины крыла.

На первый взгляд этот теоретический вывод плохо согласовывался с другим экспериментальным фактом, обнаруженным некогда братьями Райт, которые установили, что сильно изогнутые профили неэффективны. Но Чаплыгин ясно понимал причины такого расхождения: «Если углубление будет очень значительно, — писал он, — то трение будет оказывать несколько больший эффект... Вероятно, есть средний размер, являющийся наиболее выгодным в вязкой жидкости. Представляется, что эта выгодная форма соответствует сравнительно ко-



Рис. 45. Русский и советский аэродинамик С. А. Чаплыгин (1869—1942), завершивший работы по теории крыла бесконечного размаха, начатые Жуковским

роткой дуге». Таким образом, Чаплыгин строго доказал то, о чем некогда лишь смутно догадывался Вейнхэм: длинные узкие крылья с точки зрения подъемной силы выгоднее широких и коротких *.

Понимая, как важно для практики знать подъемную силу при отличных от нуля углах атаки, Чаплыгин решил исследовать и этот случай, трудность которого была в том, что на профиле в виде дуги кругового цилиндра передняя и задняя кромки представляли собой два острых угла, где скорости могли достигать бесконечных значений. Эту трудность ученый сумел преодолеть. Он насадил на переднюю кромку профиля кружок, пересе-

* В примечании к публикации своей речи, прочитанной 9 ноября 1910 года в Московском обществе воздухоплавания, С. А. Чаплыгин писал: «Когда печаталась моя работа по этому вопросу, Н. Е. Жуковский указал мне, что еще в 1902 году приват-доцент Кутта... разрешил эту задачу». Действительно, немецкий математик М. Кутта (1867—1944), увлеченный полетами и исследованиями Лилиенталя, задался целью объяснить поразивший его факт, согласно которому криволинейный профиль создает подъемную силу даже при нулевом угле атаки. Свой вывод из ненапечатанной диссертации он опубликовал в небольшой заметке в 1902 году. На этом основании некоторые западные историки находят возможным именовать теорию подъемной силы теорией Кутта — Жуковского, что, конечно, трудно признать обоснованным, ибо вклад немецкого математика в этой области несоизмерим с вкладом Н. Е. Жуковского и С. А. Чаплыгина.

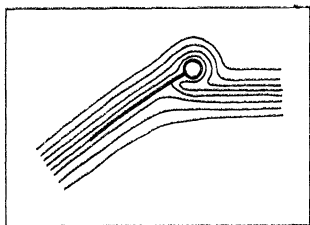


Рис. 46. Расчетная схема крыла, предложенная Чаплыгиным, которая позволила свести механическую задачу к чисто математической

кающий дугу под прямым углом. Благодаря этому допущению Чаплыгину удалось свести механическую задачу к задаче чисто математической и теоретически доказать, что существуют углы атаки, при которых подъемная сила может в 4—5 раз превышать значение, достигаемое при нулевом угле возвышения.

В 1910 году вышли из печати два фундаментальных труда — «О давлении плоскопараллельного потока на преграждающие тела» С. А. Чаплыгина и «О контурах поддерживающих поверхностей аэропланов» Н. Е. Жуковского, которые, в сущности, до конца исчерпали теорию моноплана. Перед аэродинамикой открылись два новых направления: теория крыла конечного размаха и теория гребного винта.

«Сейчас трудно понять, — писал В. В. Голубев, — почему Н. Е. Жуковский почти совершенно не занимался теорией крыла конечного размаха и посвятил свои дальнейшие работы теории пропеллеров... Может быть, здесь сказалось и то, что после разработки теории крыла в плоскопараллельном потоке Н. Е. Жуковский считал задачу крыла конечного размаха слишком простой и не заслуживающей траты сил...» Так или иначе, Н. Е. Жуковский переключился на теорию гребных винтов, а разработку крыла конечного размаха «уступил» Ф. Ланчестеру и Л. Прандтлю.

Имя английского инженера Ф. Ланчестера занимает видное место в истории автомобилестроения: он сделал несколько изобретений, в 1894 году построил свой первый автомобиль, а в 1899 основал фирму «Ланчестер мотор компани», где в своем лице совмещал обязанности управляющего и главного инженера. Не будучи профессиональным математиком и гидроаэромехаником, Ланчестер был обуреваем массой смелых и оригинальных идей, которым, увы, не всегда мог дать достаточно стро-

гое математическое обоснование и которые не всегда мог увязать с фундаментальными принципами механики.

В 1897 году он направил в Лондонское Королевское общество статью о механизме возникновения подъемной силы крыла, в которой применялись непривычные для профессионалов термины: «вихревое движение» Ланчестер именовал «периптеральным движением», а вместо слова вихрь писал «возбужденная волна». Королевское общество отвергло его работу как ненаучную. Задетый невнимательностью коллег, Ланчестер переключился на другие проблемы*, но когда появилась знаменитая статья Жуковского «О присоединенных вихрях», он в продолжение изложенных русским аэромехаником идей опубликовал две работы «Аэродинамика» и «Аэродонетика» соответственно в 1907 и 1908 годах, в которых развил основные идеи теории крыла конечного размаха.

Еще Гельмгольц в своей классической работе 1858 года доказал, что вихрь не может зарождаться или оканчиваться в толще воздуха. Окончательно развившись, он должен замкнуться либо на твердую поверхность, либо сам на себя, образовав вихревое кольцо. Ланчестер пришел к выводу, что если присоединенный к крылу вихрь достигает концевого сечения крыла, то он не может исчезнуть, раствориться в толще воздуха, а должен иметь продолжение в виде сбегającego с крыла свободного вихря. Следовательно, считал Ланчестер, крыло можно заменить вихревой системой, состоящей из присоединенного вихря, движущегося вместе с крылом, и двух свободных вихрей, срывающихся с концов крыла и тянущихся вниз, чтобы замкнуться на поверхности земли. Эта система свободных вихрей создает вокруг движущегося крыла поле наведенных скоростей, взаимодействие которых с вихрями, присоединенными к крылу, порождает подъемную силу. Вертикальная составляющая этих скоростей обуславливает появление того количества движения, которое составляет противодействие подъемной силе.

* Любопытно отметить, что еще в годы первой мировой войны он опубликовал некоторые свои идеи о методах ведения боевых действий. А 20 лет спустя выяснилось, что эти идеи есть не что иное, как зачатки новой математической дисциплины — исследования операций, — получившей значительное развитие во время второй мировой войны.

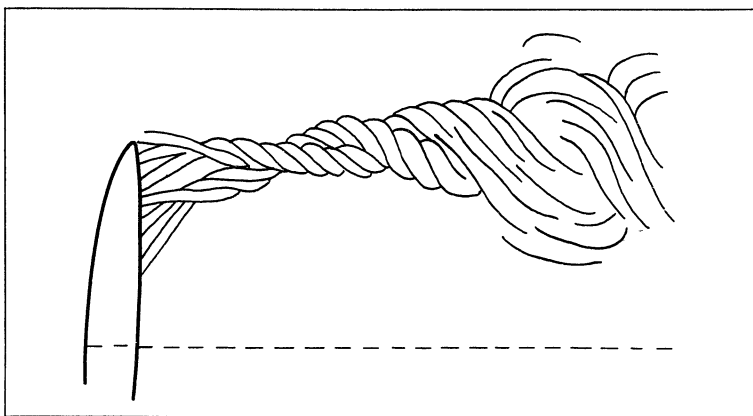


Рис. 47. Таким представлялся концевой вихрь английскому инженеру Ф. Ланчестеру (1868—1946). Эта идея англичанина оказалась ключевой в разработке теории крыла конечного размаха

Ланчестер первый установил, что даже в идеальной жидкости крыло конечного размаха испытывает особый вид сопротивления — индуктивное, вызываемое срывом свободных концевых вихрей. Это сопротивление исчезает у бесконечно длинного крыла или у крыла, скользящего между двумя параллельными поверхностями. Отсюда ясно — и это тоже понял Ланчестер, — что чем длиннее крыло по отношению к своей ширине, тем меньше его индуктивное сопротивление.

В 1908—1909 годах экспансивный англичанин часто появлялся в Геттингене и подолгу беседовал с руководителем аэродинамической лаборатории Л. Прандтлем. Об этом человеке говорили, что, будучи инженером по образованию, он был наделен редким даром понимания физического смысла явлений и столь же редким умением сводить их к простейшим математическим формулам. Многие ученики превосходили Прандтля в математических способностях, но мало кто мог сравниться с ним в умении составлять систему простых уравнений, которые, однако, учитывали существенные стороны физического явления.

Эта способность Прандтля ярчайшим образом проявилась в создании теории крыла конечного размаха, разработку которой он завершил в 1918—1919 годах.

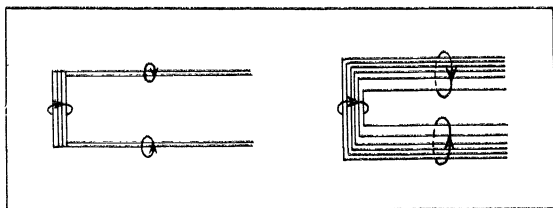


Рис. 48. Схема замены реального крыла конечного размаха пучком элементарных подковообразных вихрей, предложенная немецким аэродинамиком Л. Прандтлем

То, что в устах и писаниях Ланчестера выглядело как нечто смутное, расплывчатое, требующее от слушателя или читателя весьма развитой интуиции, в работах Прандтля оформилось в стройную и четкую схему, поддающуюся математической обработке.

Из экспериментальных продувок Прандтль прекрасно знал, что на крыле конечной длины величина циркуляции, а следовательно, и подъемной силы непостоянна вдоль размаха. Она максимальна в середине крыла и падает до нуля на концах. Получить такое распределение циркуляции с помощью одного подковообразного вихря, состоящего из присоединенного и двух примыкающих к нему свободных вихрей, нельзя. Реальное крыло конечного размаха следует заменить пучком примыкающих друг к другу элементарных подковообразных вихрей, так чтобы создаваемая ими суммарная циркуляция и подъемная сила соответствовали реальному распределению. В таком случае с задней кромки крыла будет сбегать вихревая пелена, которая вследствие неустойчивости станет сворачиваться в две вихревые трубки, текущие вдоль потока.

Чем резче перепады в распределении циркуляции вдоль размаха, тем более интенсивны срывающиеся с крыла свободные вихри и тем большее индуктивное сопротивление испытывает крыло. Прандтль и его ученик М. Мунк стали искать такое распределение подъемной силы вдоль размаха крыла, чтобы его индуктивное сопротивление было минимальным. Решить эту задачу Мунку удалось лишь к концу первой мировой войны: оказалось, что индуктивное сопротивление минимально

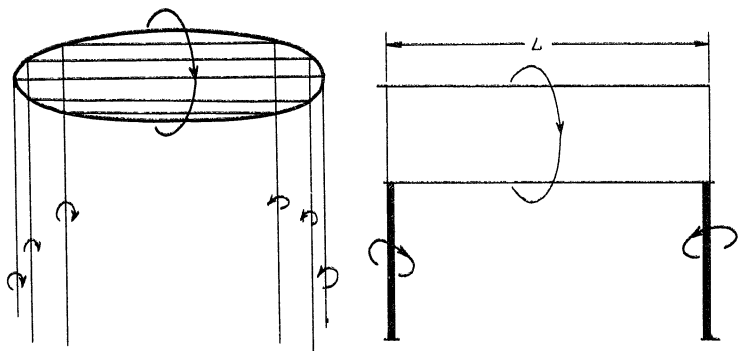


Рис. 49. Справа — прямоугольное крыло с большим индуктивным сопротивлением. Слева — эллиптическое в плане крыло с минимальным индуктивным сопротивлением, разработанное немецким аэродинамиком М. Мунком

тогда, когда циркуляция вдоль размаха меняется по эллиптическому закону. При постоянном угле атаки такое наиболее выгодное с точки зрения снижения индуктивного сопротивления распределение циркуляции получается у крыла, имеющего в плане форму эллипса. Вот почему в последующие годы конструкторы, которые особенно пеклись об аэродинамическом совершенстве своих самолетов, применяли эллиптические в плане крылья, хотя они и были более сложными в производстве. В частности, в Советском Союзе эллиптические крылья широко применял украинский конструктор К. А. Калинин, а в Англии — Р. Митчелл, создатель знаменитого истребителя второй мировой войны «спитфайр».

Попытку разработать теорию крыла конечного размаха предпринял также и С. А. Чаплыгин. В 1913 году на заседании Московского математического общества он сделал первое сообщение о своих изысканиях, в котором рассказал о подковообразных вихрях и указал на необходимость появления индуктивного сопротивления. Заинтересовавшись этим сообщением, Жуковский в круглой аэродинамической трубе Московского технического училища провел интересный эксперимент: на пути струй, сбегавших с концов крыла, были поставлены две вертушки, вращение которых сделало видимыми для

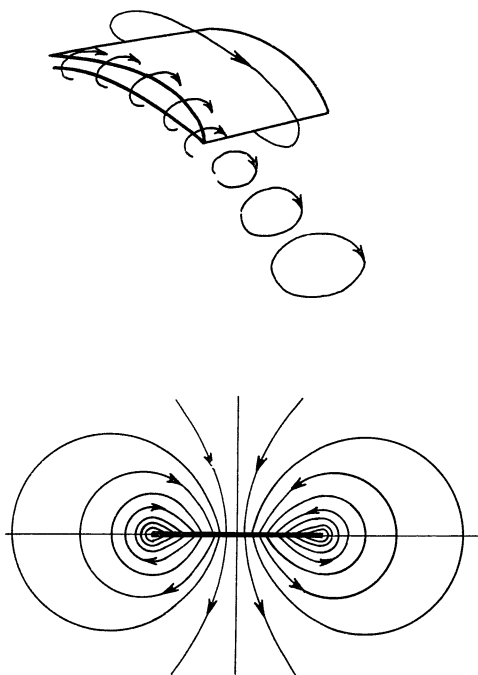


Рис. 50. Схема возникновения свободного вихря, сбегаящего с кромки крыла конечного размаха (вверху). Течение позади авиационного крыла (внизу)

исследователей сбегаящие с концов крыла свободные вихри. Но по каким-то причинам Чаплыгин не продолжил этой работы, а полученных результатов не опубликовал, считая их незавершенными. Такое пренебрежение к обнародованию своих исследований характерно для Чаплыгина. «В его рукописях, — пишет советский историк Г. Михайлов, — впоследствии было обнаружено много интересных результатов, относящихся как к гидроаэродинамике, так и к теории упругости, которые никогда не были им опубликованы или использованы. Все эти результаты справедливо связываются теперь с именами других ученых».

Как видим, создание теории подъемной силы крыла — этого величайшего достижения гидродинамики

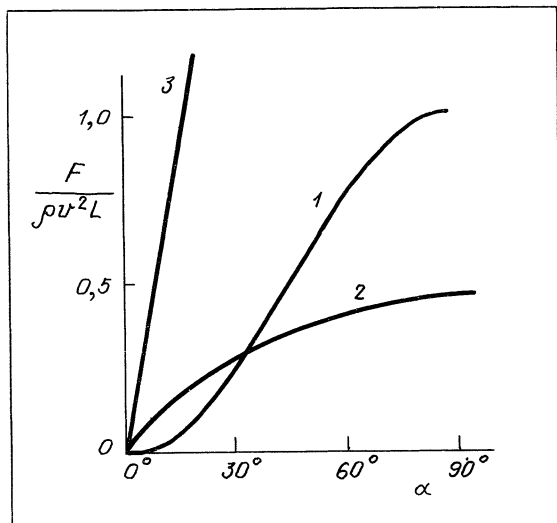


Рис. 51. Сила, действующая на плоскую пластину в зависимости от угла атаки: 1 — по теории Ньютона; 2 — по теории Рэлея; 3 — по современной теории, соответствующей экспериментальным данным

идеальной жидкости — потребовало колоссальных усилий самых выдающихся ученых. Но еще большие трудности встали на пути тех, кто, стремясь разгадать тайну лобового сопротивления, сосредоточил внимание на исследовании движения вязких жидкостей...

Сопротивление, рожденное завихрениями

С тех пор как Эйлер и Д'Аламбер убедились в том, что тело, движущееся в идеальной жидкости, не испытывает с ее стороны никакого противодействия, вопрос о гидродинамическом сопротивлении стал буквально камнем преткновения для всей гидроаэромеханики. Эксперименты Фруда и его методика измерения сопротивления, предназначавшаяся только для сравнительно хорошо обтекаемых корабельных корпусов, не разрешили этого парадокса. Вычисление сопротивления даже простейших плохо обтекаемых тел вроде шара или цилиндра по-прежнему оставалось за семью печатями.

В 1868—1876 годах три крупных исследователя попытались преодолеть этот парадокс, дискредитирующий построения теоретиков в глазах практиков. То были Г. Гельмгольц, Г. Кирхгоф и лорд Рэлей. Они заложили основы так называемой теории струй, исходявшей из того предположения, что в жидкости за каждой кромкой плоской наклонной пластины возникают поперечности разрыва, создающие за пластиной уходящую в бесконечность застойную зону. При таком предположении сопротивление должно было отличаться от нуля даже в том случае, если движение происходило в идеальной, лишенной вязкости жидкости. Однако расчеты, сделанные по формулам Кирхгофа и Рэлея, давали значения сопротивления, резко расходящиеся с опытными данными, и потому эта теория не привлекла к себе внимания инженеров. Д. И. Менделеев, не уделив теории струй никакого внимания, особенно подробно рассматривает более важный для практики случай движения тел в вязкой жидкости.

Здесь наибольшей известностью пользовалась тогда так называемая теория каналов, которую разработали французы А. Сен-Венан (1797—1886) и Ж. Понселе (1788—1867). Они распространили представление Ранкина о прилипающем к движущейся поверхности завихренном слое, разработанное шотландцем только для хорошо обтекаемых тел, на тела с резко изменяющимися обводами. По их мнению, тело, окутанное со всех сторон налипшей на него жидкостью, движется вместе с этим сгустком как бы в идеально гладком канале, проложенном в невозмущенной окружающей жидкости, причем струи, сходящие с тела, попадая на неподвижные стенки воображаемого канала, тормозятся и, теряя свою скорость, передают им свою кинетическую энергию.

Любопытно, что в этих двух несоответствующих действительности теориях содержались две фундаментальные идеи — идея примыкающего к телу пограничного слоя и идея застойной зоны, образующейся за движущимся телом, — объединение которых через двадцать пять лет полностью решило проблему гидродинамического сопротивления. Но прежде чем такое объединение смогло произойти, потребовалось разгадать одну из самых удивительных и сложных гидродинамических загадок XIX века...



Рис. 52. Немецкий инженер Г. Гаген (1797—1884), открывший закон течения жидкостей в капиллярных трубках

«Сен-Венан... прямо сравнивает сопротивление с течением по трубкам и каналам, как делают и все другие вслед за ним», — писал Д. И. Менделеев в 1880 году. Такое отождествление обтекания тела с течением по трубкам можно было бы считать колоссальным успехом в понимании гидродинамического сопротивления, если бы в распоряжении исследователей уже имелась хорошо разработанная теория течения жидкостей в трубах и каналах. Но если можно было бы выбрать наименее подходящий для подобного утверждения год, то им стал бы именно 1880, ибо как раз в этом году странное противоречие, постепенно раздиравшее гидравлику, достигло кульминации. И вызвано оно было не отсутствием надежных сведений, а тем, что чрезвычайно точные, достоверные многочисленные эксперименты неопровержимо доказывали справедливость двух совершенно разных утверждений...

Начало этим экспериментам положил немецкий инженер-строитель Г. Гаген. Окончив университет, он полтора года путешествовал пешком по Европе, осматривая наиболее примечательные гидравлические сооружения. Возвратившись на родину, он занялся инженерной деятельностью — именно он спроектировал военно-морскую базу в Вильгельмсхафене. В 1839 году Гаген опубликовал результаты своих обширных исследований по

изучению влияния температуры на сопротивление жидкости, текущей в трубках малого диаметра, в ходе которых он установил формулу для вычисления сопротивления.

Одновременно с ним во Франции аналогичные эксперименты провел врач Ж. Пуазейль (1799—1869), который изучал мощность сердца и движения крови в венах и капиллярных сосудах. В 1841 году он опубликовал найденную им формулу, которая совпала с гагеновой: сопротивление жидкости R , текущей в трубе, прямо пропорционально вязкости η и скорости V и обратно пропорционально квадрату диаметра трубы D — $R \propto \frac{\eta V}{D^2}$,

Воистину, формула эта доставляла утешение здравому смыслу. Если вязкость равна нулю, то и сопротивление равно нулю. Естественно предположить, что чем больше вязкость, тем больше сопротивление — и формула подтверждает это предположение. А скорость? Ясно, чем она больше, тем выше и сопротивление — и это подтверждается формулой Гагена — Пуазейля. Понятно и влияние диаметра: чем он меньше, тем труднее двигаться жидкости.

Однако коварная гидравлика приберегла свой сюрприз напоследок. Уроженец Дижона А. Дарси (1803—1858), получив инженерное образование в Париже, вернулся на родину, где ему поручили спроектировать и построить городской водопровод. Необычайный успех этого сооружения принес инженеру славу, и он был приглашен для сооружения водопровода в Брюссель. В ходе этих работ Дарси провел свои знаменитые научные исследования по фильтрации жидкости сквозь почву и по течению воды в трубах. Но, удивительное дело, найденная им формула не имела ничего общего с формулой Гагена — Пуазейля!

Сопротивление в опытах Дарси получалось прямо пропорциональным квадрату скорости и обратно пропорциональным диаметру трубы: $R \propto \frac{\eta V^2}{D}$! Устранить

расхождение между формулами оказалось не так-то просто. С одной стороны, добросовестнейшие экспериментаторы англичанин Дж. Стокс, швейцарец Э. Гагенбах, немец Ф. Нейман снова и снова получали доказательства того, что прав Пуазейль. С другой — не менее добросовестные исследователи англичанин Дж. Ран-

кин, немцы Ф. Грасгоф и О. Мейер добывали столь же неопровержимые подтверждения тому, что прав Дарси. Особенно драматичным оказалось положение Гагена. Экспериментируя с капиллярными трубками, он убеждался: прав он и Пуазейль; а экспериментируя с водопроводными трубами, приходил к иному выводу: прав он и Дарси... Впечатление получалось такое, будто вода ведет себя как лукавый озорник, подчиняясь то одному, то другому закону...

Вот какой напряженной драматической конфронтации достигли к 1880 году исследования, начало которым положила простая короткая фраза из ньютоновых «Математических начал»: «Сопротивление, происходящее от несовершенной скользкости частиц жидкости, при разных скоростях и прочих равных обстоятельствах, пропорционально скорости относительного движения частиц». Исследования гидравликов XVIII века не подтвердили этого предположения Ньютона. Они нашли, что сопротивление жидкости в трубах, зависящее, как им казалось, только от трения, пропорционально квадрату скорости. И лишь в конце века Кулон, вспомнив, что сам Ньютон считал сопротивление качающегося в воздухе шара зависящим от разных степеней скорости, предположил: при очень медленном движении сопротивление полностью определяется трением и зависит от первой степени скорости, а при быстром — в действие вступают силы соударения частиц, пропорциональные квадрату скорости. И его опыты с крутильными весами как будто подтвердили эту точку зрения.

Однако дальнейшие события показали, что дело не такое простое: на зависимость сопротивления от скорости каким-то сложным и необычным образом влияли диаметры труб, вязкость и температура жидкости, ее давление. Поэтому Д. И. Менделеев в 1880 году имел все основания утверждать: «До сих пор нет достаточно прямых опытов для твердого суждения об этом предмете, хотя он имеет, можно сказать, капитальнейшее значение для многих частей гидродинамики». Но как раз тогда, когда Дмитрий Иванович писал эти строки, два человека в мире уже были близки к разрешению парадокса, разделившего гидравликов на два лагеря. То были два ученых-инженера — русский Н. П. Петров (1836—1920) и англичанин О. Рейнольдс...

Крупнейший деятель техники Н. П. Петров был в

курсе всех организационных, экономических, административных, технических и научных проблем, которые ставились перед инженерами-путейцами стремительным развитием русских железных дорог в конце XIX века. Во время русско-турецкой войны Н. П. Петров искусно организовал доставку невыходивших на Дунай по железной дороге. Он первый научно разработал технологию перевозки и хранения зерна и угля. Под его наблюдением строилась великая транссибирская магистраль, равной которой не знает ни одна страна мира. Он был инициатором создания Московского инженерного училища — нынешнего Московского института инженеров транспорта. Он был председателем Русского технического общества, председателем Международного железнодорожного конгресса 1892 года и пожизненным членом бюро конгресса, председателем Инженерного совета министерства путей сообщения и т. д. и т. п.

В 1870-х годах стало ясно, что колоссальное развитие машиностроения и особенно железных дорог в скором времени станет сдерживать дороговизна смазочных масел растительного и животного происхождения. Вместе с тем на рынке явились тогда дешевые масла, получаемые из нефти и угля, и возник вопрос: как выбирать смазочный материал и смогут ли новые дешевые продукты заменить прежние?

Взявшись за решение этого вопроса, Н. П. Петров разработал гидродинамическую теорию смазки, в которой ясно указал на существование двух различных режимов течения жидкостей в трубе. В первом режиме жидкость движется прямолинейно и параллельно оси трубы в виде вложенных один в другой цилиндрических слоев, движение которых напоминает удлинение подвижной телескопической трубы. Сопротивление в этом случае пропорционально первой степени скорости, как в опытах Гагена — Пуазейля. Во втором режиме в движущейся жидкости появляются вихри, разрывы, поперечные движения, и сопротивление трения, согласно опытам Дарси, становится пропорциональным квадрату скорости. Это наблюдение Петрова стало ключевой идеей в замечательных открытиях английского гидродинамика О. Рейнольдса...

Имя этого человека известно всем инженерам-гидравликам, гидростроителям, энергетикам, химикам-технологам и вообще тем, кому приходится иметь дело с по-

токами вязкой жидкости. Молодой инженер-практик Рейнольдс решил, что для успешной деятельности ему недостает математических познаний. Изучив греческий язык, необходимый для поступления в Кембриджский университет, он становится студентом и быстро достигает успехов в математике. По окончании Кембриджа Рейнольдс получает кафедру физики в Манчестерском университете, где и делает впоследствии все свои важные открытия.

В своих работах Рейнольдс осветил многие важные для техники и прикладных наук вопросы: образование града, конденсация паровоздушной смеси, теория сопла Лаваля, отслаивание металла с поверхности рельса и т. д. Рейнольдс мужественно встретил угасание творческой активности. Убедившись, что последние его трактаты оказались непонятыми из-за утраченной им ясности изложения, он в 1905 году отстранился от дел и до конца жизни не занимался больше научной работой.

Гидродинамические исследования, принесшие Рейнольдсу мировую славу, он начал в 1877 году статьей «Вихревое движение», в которой доказывал: сопротивление движущегося в жидкости тела сильно зависит от завихрений, возникающих за его кормовой частью. Впуская струйки красителя в поток, он сумел наглядно показать, какие сильные завихрения срываются с краев диска, поставленного поперек потока, и как немного вихрей образуется за кормой каплевидного тела такого же сечения. Удивительно ли, что сопротивление обтекаемого тела в несколько раз меньше, чем у диска?

Но только ли вблизи движущегося тела образуются вихри? Или они могут возникать и в толще самой движущейся жидкости?

Ответы на эти вопросы Рейнольдс дал в двух статьях, опубликованных в 1883—1884 годах, в которых были развиты идеи Н. П. Петрова.

Тонкая струйка красителя, введенная в воду, текущую в стеклянной трубке, быстро вытягивается в длинную резко очерченную, не смешивающуюся с водой полосу, параллельную стенкам трубки. Вода как будто движется концентрическими слоями, как вложенные одна в другую металлические трубки: внутренняя быстрее, примыкающая к ней — чуть медленнее, следующая — еще медленнее. Слоистым — ламинарным — называет Рейнольдс такое течение.

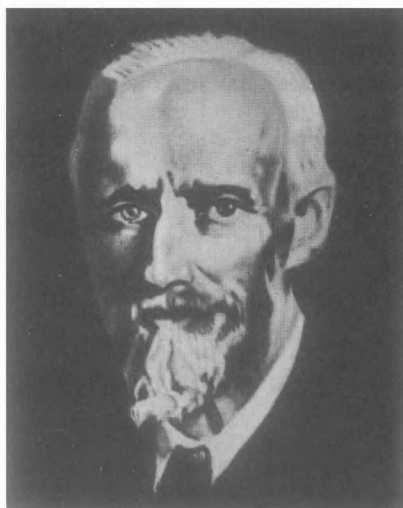


Рис. 53. Английский ученый О. Рейнольдс (1842—1912), открывший существование двух принципиально различных режимов течения жидкостей—ламинарного и турбулентного

Рис. 54. Изменение течения подкрашенной струйки жидкости в воде по мере увеличения числа Рейнольдса Re — в данном случае скорости движения



$R = 32$



$R = 55$



$R = 65$



$R = 71$



$R = 102$



$R = 161$



$R = 225$



$R = 281$

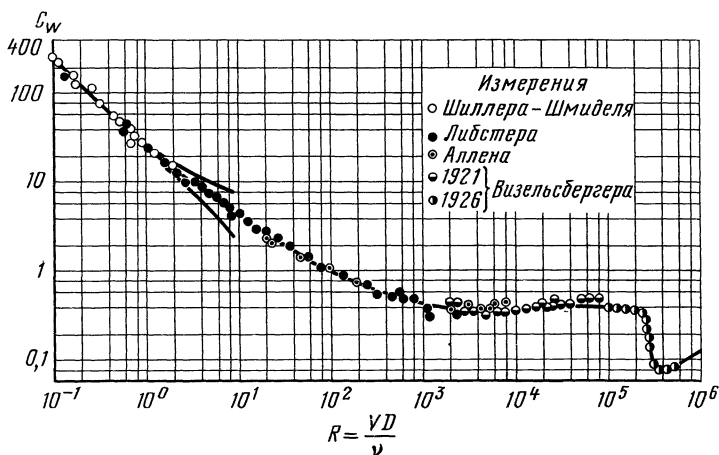


Рис. 55. Экспериментальная зависимость коэффициента сопротивления шара от числа Рейнольдса. Если значение этого числа не превышает 2300, течение ламинарное. Если оно больше 6000 — течение турбулентное. Из графика ясно видно, что при числе Рейнольдса, равном 400 000, коэффициент сопротивления скачком уменьшается с 0,4 до 0,08, то есть в 5 раз

А если увеличить скорость? Сразу, резким скачком замедляется движение подкрашенной струйки. Видно, как быстрые беспорядочные завихрения перемешивают краску с водой по всему объему трубки — ламинарное течение потеряло устойчивость, превратилось в вихревое течение, для которого позднее лорд Кельвин придумал великолепное слово — турбулентное течение.

Стараясь как можно понятнее объяснить своим ученикам физический смысл происходящего в трубке процесса, Рейнольдс придумал любопытную аналогию. «Жидкость, — говорил он, — можно уподобить отряду солдат, ламинарное течение — четкому походному строю, турбулентное — беспорядочному движению. Тогда скорость жидкости и диаметр трубы — это скорость движения и величина отряда. Вязкость — дисциплина, плотность — вооружение. Чем больше отряд, чем быстрее маневры и чем тяжелее вооружение — тем раньше расстраивается походный порядок. И так же в жидкости турбулентность начинается тем быстрее, чем она тяжелее, чем меньше ее вязкость и больше диаметр и скорость».

Предположив, что устойчивость ламинарного течения зависит от соотношения сил вязкости и сил инерции, Рейнольдс получил безразмерную величину — знаменитое «число Рейнольдса» *, которое как раз и управляет движением вязких жидкостей в трубах. Если оно меньше 2300, течение всегда ламинарное, а если оно больше 6000, то течение всегда турбулентное. Если число Рейнольдса лежит в интервале 2300—6000, течение неустойчивое.

Эта зависимость справедлива для любых жидкостей: воды, воздуха, ртути, меда, нефти. Разница лишь в том, что для вязких и легких жидкостей число Рейнольдса, равное 2300, получается при сравнительно больших скоростях и диаметрах. Жидкости же подвижные и тяжелые могут течь ламинарно лишь в капиллярных трубках и при малых скоростях.

Теперь ясно, почему получились столь разительные расхождения в опытах Гагена — Пуазейля и Дарси. Первые проводили свои измерения в капиллярных трубках. В их опытах число Рейнольдса было меньше 2300, а выведенная ими формула оказывалась справедливой лишь при ламинарных течениях. Дарси же проводил свои эксперименты над течениями, для которых число Рейнольдса было больше 6000, и его формула справедлива для турбулентных течений.

Великолепное открытие Рейнольдса не только разрешило наболевший гидравлический конфликт, оно оказалось ключевым в центральной проблеме гидроаэромеханики на всем протяжении ее существования — в разгадке тайны лобового сопротивления цилиндра и шара...

Разрешение парадоксов

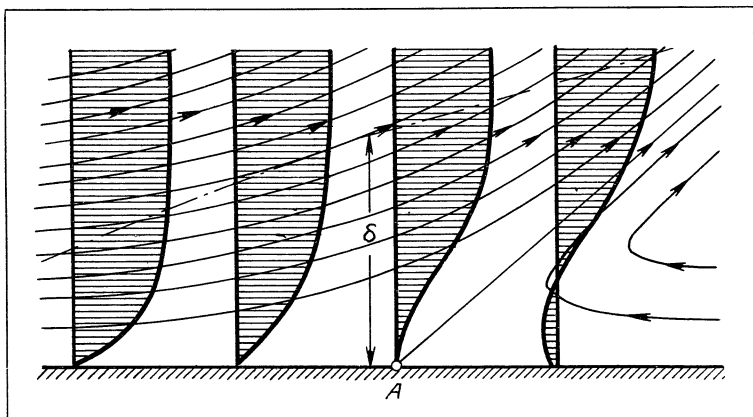
В 1911 году в аэродинамической лаборатории Л. Прандтля в Геттингене появился молодой аэродинамик из Австро-Венгрии Т. фон Карман. Каждое утро, проходя на свое рабочее место, он окликал докторанта, неизменно возившегося около какой-то экспериментальной установки: «Ну что, герр Хименц? Вам удалось добиться устойчивого течения?»

* Этот критерий «числом Рейнольдса» стали называть в 1919 году, когда немецкий гидродинамик М. Вебер (1871—1951) ввел в научный обиход число Рейнольдса — *Re*.



Рис. 56. Немецкий аэродинамик Л. Прандтль (1875—1953), создавший теорию крыла конечного размаха и теорию пограничного слоя

Рис. 57. Схема отрыва пограничного слоя от плоской стенки, движущейся в потоке вязкой жидкости. Отрыв проходит в точке А, за которой возникают мощные вихри, создающие сильные колебания давления



— Нет, — уныло отвечал тот. — Оно все время пульсирует...»

Так продолжалось несколько недель, но как-то раз Карман задумался над причиной пульсаций и в течение двух дней сделал один из важнейших вкладов в учение о гидродинамическом сопротивлении.

Специалистов давно беспокоил еще один гидродинамический парадокс: почему в воздухе и воде — жидко-

стях с довольно малой вязкостью, в которых силы трения гораздо меньше сил инерции и давления, — при движении тел возникают сопротивления, огромные по сравнению с теоретически вычисленными?

В поисках ответа Л. Прандтль в 1904 году показал, что движущееся тело как бы обволакивается тонким слоем жидкости — пограничным слоем. Благодаря вязкости внутренние частицы этого слоя как бы прилипают к стенке, и их скорость относительно тела равна нулю. На поверхности же пограничного слоя скорость частиц равна скорости обтекания. В тончайшем пограничном слое силы трения сравнимы с силами инерции и давления, а вне его пренебрежимо малы.

Что же происходит в простейшем случае при обтекании пластинки в продольном направлении?

Благодаря торможению вниз по течению пограничный слой становится все толще и толще. Заторможенная жидкость оттесняет внешний поток от пластинки и, наконец, пограничный слой отрывается от движущегося тела, и это порождает мощные вихри и резкое искажение давлений вокруг тела. В случае тонких пластин с заостренными концами эти перемены давления выливаются в колебания боковых усилий, представление о которых дает трепетание полотнища флага на ветру. Но для тел с тупыми кормовыми оконечностями такой процесс может означать резкое увеличение сопротивления за счет возникновения широкого следа с пониженным давлением, заполненного оторвавшимися от поверхности тела вихрями. Таким образом, незначительное само по себе трение оказывается своеобразным спусковым механизмом, вызывающим мощное вихреобразование — источник большого сопротивления*.

В 1911 году докторант К. Хименц по заданию Пран-

* О том, как сильно зависит сопротивление тела от возникающих за ним вихрей, можно судить по знаменитому «парадоксу Дюбуа», который на протяжении целого столетия бросал вызов ученым-гидроаэродинамикам. Со времен Ньютона физики считали, что к гидродинамическим исследованиям приложим принцип относительности, согласно которому результаты опытов не зависят от того, что относительно чего движется: вода ли набегает на неподвижное тело или, наоборот, тело протаскивается сквозь неподвижную воду. Дюбуа же на практике убедился, что двигать тело в неподвижной воде легче, чем удерживать его в потоке воды, набегающей с такой же скоростью! Лишь в 1891 году этот парадокс разрешил Н. Е. Жуковский.

дтля должен был построить водяной лоток для исследования отрыва потока от поверхности цилиндра. Ученый должен был проверить, совпадает ли точка отрыва пограничного слоя с вычисленной теоретически? Для этих экспериментов сначала требовалось установить распределение давлений вокруг цилиндра в равномерном потоке.

И тут, к своему изумлению, Хименц убедился, что течение за цилиндром не устойчивое, а совершает мощные пульсации.

Когда он сказал об этом Прандтлю, тот предположил, что либо цилиндр недостаточно кругл, либо лоток несимметричен; и Хименц начал кропотливую, но, как выяснилось, безнадежную работу по регулировке своей установки. Но однажды фон Карман задумался: а надо ли принудительно устранять пульсации. Раз поток пульсирует, значит, на то есть естественные и существенные причины, которые стоят того, чтобы их изучить.

«Однажды в воскресенье, — вспоминал потом Карман, — я попытался рассчитать устойчивость системы вихрей и сделал это весьма примитивно, предположив, что только один вихрь волен двигаться в то время, как все остальные зафиксированы... Полученный результат гласил, что при симметричном расположении неподвижных вихрей подвижный всегда уходит из своего первоначального положения. Такой же результат получился и для асимметричного расположения, но оказалось, что при определенном расстоянии между рядами и двумя последовательными вихрями подвижный вихрь не уходит и остается вблизи своего первоначального положения, описывая вокруг него небольшие замкнутые траектории.

Он доказал, что в спокойной жидкости за движущимся телом возникает вихревое кольцо, следующее за ним, а струи жидкости огибают это кольцо и за ним смыкаются. Когда же жидкость набегает на неподвижное тело, то в ней всегда существуют завихрения, которые не дают струйкам смыкаться за вихревым кольцом на некотором расстоянии от тела. В результате за ним тянется широкий вихревой след, в котором давление понижено и который поэтому создает большое сопротивление. Если предпринять специальные меры против возникновения завихрений в потоке, то сопротивления в обоих случаях получаются одинаковыми. Справедливость своего объяснения Жуковский продемонстрировал с помощью прибора, сконструированного им и его учеником В. В. Кузнецовым.

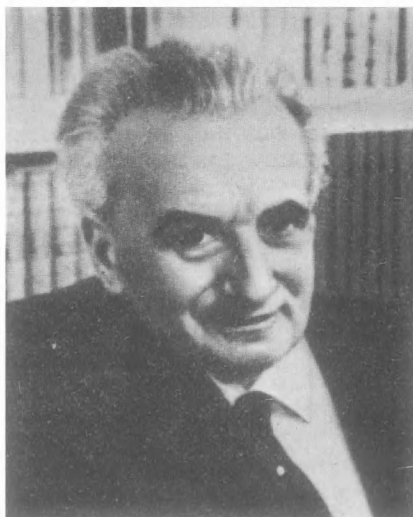
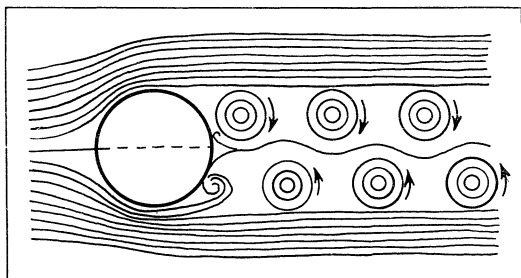


Рис. 58. Американский аэродинамик Т. фон Карман (1881—1963), разработавший теорию вихревых дорожек за движущимися цилиндрами и пластинами и создаваемого ими лобового сопротивления

Рис. 59. Схема вихревой дорожки Кармана



Я закончил работу к понедельнику, и утром, показав ее Прандтлю, спросил:

— Что вы скажете на это?

— О, это кое-что важное, — сказал он. — Напишите об этом статью, и я представлю ее в Академию.

Так появилась моя первая статья на эту тему».

Систему вихрей, следующих в шахматном порядке за движущимся цилиндром или поперечной пластиной, впоследствии стали именовать «вихревой дорожкой Кармана», хотя сам ученый никогда не утверждал, будто он первый обнаружил такие вихри. Напротив, он подчеркивал, что задолго до него вихревые дорожки наблюдал и фотографировал англичанин Г. Мэллок, их

изучал француз А. Бенар, их исследовал с помощью са-
моподдерживающихся колебаний маятника в водяном
потоке русский Д. П. Рябушинский.

Но Карман претендовал на то, что именно он пер-
вый доказал неустойчивость симметричных вихрей, сле-
дующих за движущимся в жидкости телом; что именно
он вычислил то единственное соотношение между попе-
речным и продольным шагами расположенных в шах-
матном порядке вихрей, при котором система делается
устойчивой; что именно он дал строгую формулу лобов-
ого сопротивления, создаваемого вихревой дорожкой
даже в идеальной жидкости. Короче говоря, Карман
претендовал на то, что именно он на частном случае
показал механизм вихревого сопротивления, которое
вкуче с сопротивлением трения, волновым и индуктив-
ным исчерпывает все случаи взаимодействия твердых
тел с жидкостными потоками.

Успех Кармана был должным образом оценен его
современниками. В 1913 году Н. Е. Жуковский гово-
рил: «Можно ждать от распространения теории убега-
ющих вихрей на сопротивление шара... объяснения па-
радоксальных на первый взгляд явлений, получаемых
при изучении изменения силы сопротивления шара со
скоростью». Какие же «парадоксальные явления» имел
в виду Николай Егорович?

Мы уже писали о том, что ученые Европы на протя-
жении нескольких столетий не уставали эксперименти-
ровать с шарами, падающими в воздухе и воде, для
определения коэффициента сопротивления и что полу-
ченные ими величины имели большой разбой. Менде-
леев правильно объяснял его тем, что коэффициент со-
противления шара не постоянен и зависит от скорости,
но выяснение этой зависимости он предоставил гряду-
щим исследователям. И они не замедлили явиться.

В 1911 году на I Всероссийском воздухоплаватель-
ном съезде в Петербурге ученик Жуковского Г. И.
Лукьянов доложил об удивительном открытии: оказа-
лось, что коэффициент сопротивления шара при увели-
чении скорости от 6 до 12 м/с резко уменьшается. Это
сенсационное сообщение вызвало недоверие у некото-
рых делегатов съезда, но через год знаменитый фран-
цузский инженер-строитель А. Эйфель (1832—1923) под-
твердил сообщение русского исследователя. На склоне
лет Эйфель, занявшись аэродинамическим сопротивле-

нием строительных конструкций, соорудил в Париже трубу. Продувая в ней шары, он в 1912 году обнаружил парадокс, названный впоследствии его именем: при некоторой критической скорости сопротивление шара резко, скачком, уменьшается в 4—5 раз!

Доказав существование этого удивительного факта, Эйфель не смог дать ему какое-нибудь разумное объяснение, и за эту задачу взялся Прандтль. Именно его исследования показали, наконец, какую поистине головоломную загадку на протяжении веков ставил перед учеными полет шара в воздухе...

Если бы ученым предложили поставить памятник в честь геометрического тела, сыгравшего наиболее важную роль в развитии науки, они скорее всего выбрали бы шар — самое простое и самое удивительное из всех геометрических тел. Именно сферическую форму автоматически принимают капельки тумана в воздухе, пузырьки газа в воде, планеты и звезды в космосе. Шар — наивыгоднейшая форма для активной зоны реактора, резервуара для хранения газов и жидкостей, для глубоководного и космического аппаратов.

Однако для ученых важнее всего то, что шар симметричен относительно любой оси и плоскости, проходящей через его центр; что он, если так можно выразиться, напоминает «раздутую точку». Именно поэтому многие уравнения физики, головоломные для других фигур, для шара очень просты. Например, закон всемирного тяготения проще всего выглядит тогда, когда притягивающиеся тела — сферы. Соударение двух шаров — простейший частный случай в теории удара. А электростатика начинается с изучения взаимодействия двух заряженных шариков...

Так вот, один из величайших гидроаэродинамических парадоксов, доставивших исследователям массу трудностей и разочарований, состоит в том, что сопротивление движущегося в жидкости шара являет собой едва ли не самый сложный случай во всей теории сопротивления...

Поместив в аэродинамическую трубу шар, Прандтль начал обдувать его потоком воздуха, в который были введены струйки дыма. Пока движение было очень медленным, пограничный слой, примыкавший к поверхности шара, плавно огибал его и почти смыкался за ним так, что лишь тоненькая струйка вилась за кормовой

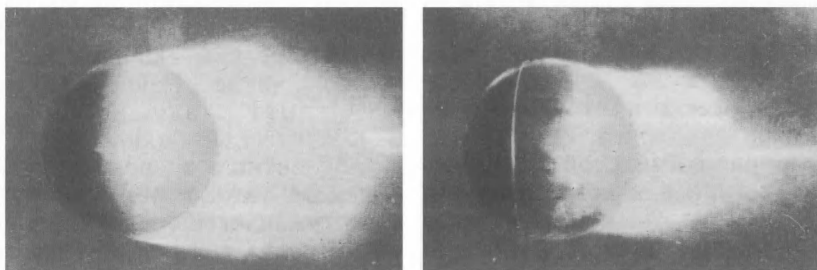


Рис. 60. Разгадка «парадокса Эйфеля». Слева — шар, обдуваемый потоком воздуха при ламинарном пограничном слое; отрыв потока происходит перед миделевым сечением, лобовое сопротивление велико. Справа — на среднюю полусферу надето тонкое проволочное кольцо, турбулизирующее пограничный слой. Отрыв потока смещается за миделевое сечение, лобовое сопротивление резко падает

оконечностью. По мере увеличения скорости пограничный слой начинал отрываться все раньше и раньше, и вихревой след за шаром, увеличиваясь в размерах, создавал все большее и большее сопротивление. Постепенно зона отрыва потока достигала миделя — среднего сечения шара — и перемещалась даже на носовую полусферу. И в этот момент происходила удивительная вещь!

Вдруг резким скачком точки отрыва потока снова смещались назад, в кормовую полусферу, зона завихрений при этом резко сужалась и сопротивление скачком уменьшалось на 75—80%! Скорость, при которой это происходило, Прандтль называл критической. Что же происходило при этой скорости в потоке вокруг шара?

Прандтль установил, что течение в самом пограничном слое может быть, как и течение в трубах или каналах, ламинарным или турбулентным. С точки зрения снижения сопротивления трения ламинарный пограничный слой всегда выгоднее турбулентного, но у него есть одно свойство, оборачивающееся недостатком, когда речь идет о сопротивлении тела с тупой кормовой оконечностью. Ламинарный пограничный слой легче и быстрее отрывается от обтекаемой поверхности, создавая широкий вихревой след и большое сопротивление. Турбулентный пограничный слой, напротив, создает большее сопротивление трения на поверхности тела, но зато лучше прижимается к ней и позже отрывается.

Как в трубах и каналах, ламинарный пограничный слой превращается в турбулентный резким скачком по достижении критического значения числа Рейнольдса, и именно в этом переходе была скрыта загадка эйфелева парадокса. При некоторой критической скорости пограничный слой становился турбулентным и снова прижимался к поверхности обтекаемого тела, в результате чего отрыв потока смещался за миделевое сечение в кормовую часть, и вихревая зона резко сужалась, а сопротивление уменьшалось при этом впятеро.

Прандтль решил выяснить, нельзя ли, искусственно турбулизируя пограничный слой, получить снижение сопротивления при скоростях, меньших критической? Надев на лобовую часть шара тонкое проволочное кольцо, вызывавшее вихреобразование в пограничном слое, он добился того, что отрыв потока сместился за миделевое сечение и сопротивление при докритических скоростях стало у шара с кольцом гораздо меньше, чем у гладкого!

Испытания Прандтля, завершенные в 1914 году, показали, как глубоки и нетривиальны процессы, связанные с полетом обычного шара в воздухе. А разработанная им теория пограничного слоя дала наконец ученым и инженерам возможность строго научно вычислять сопротивление трения плоских и криволинейных поверхностей. До ее появления отрыв потока можно было предсказать только тогда, когда на его пути была острая кромка. Теория пограничного слоя позволила вычислять место отрыва потока и тогда, когда острые кромки на нем отсутствуют: а ведь узнать, где оторвется поток, значит предсказать величину вихревого сопротивления. Наконец, теория пограничного слоя ясно указала границы применимости теорий крыла бесконечного и конечного размахов, которые только до тех пор дают согласные с действительностью результаты, пока обтекающий крыло поток не оторвался от его поверхности.

Все эти фундаментальные теоретические разработки московской и геттингенской школ и составили тот научный фундамент, без которого была бы невозможна героическая эпоха авиации — эпоха великих перелетов 1920—1930 годов.

Глава VI. «ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПОБЕДЫ»

В

эпоху эскадренных сражений военные моряки называли «эксплуатацией победы» заключительную фазу боя. Она начиналась после того, как главные силы противника были сломлены и обращались в бегство, и состояла в преследовании и уничтожении вражеских кораблей. В развитии гидроаэромеханики положение, напоминающее такую фазу, сложилось к 1920-м годам...

После того как великие теоретики разработали математическую теорию подъемной силы и лобового сопротивления, началась огромная по объему кропотливая работа, суть которой лучше всего можно выразить словами Ж. Фурье. «Математический анализ, — писал в 1822 году этот замечательный французский физик и математик, — может вывести выражение законов природы из общих и простых явлений; но специальное применение этих законов к сложным явлениям требует долгого ряда точных наблюдений».

Проведение такого «ряда точных наблюдений» потребовало квалифицированных исследователей, которые многократно превосходили численность групп, некогда сосредоточивавшихся при университетских кафедрах. Изменился и характер научной работы: период примитивных самодельных установок и приборов кончился, и во всех странах сооружались теперь крупные исследовательские центры. К середине XX века число аэродинамических труб достигает примерно тысячи, а опытовых бассейнов — нескольких десятков.

В нашей стране после Великой Октябрьской революции в полной мере проявилась практическая ценность того колоссального научного задела, который был создан Н. Е. Жуковским и его учениками. 15 де-

кабря 1918 года В. И. Ленин подписал указ о создании Центрального аэрогидродинамического института — ЦАГИ. Плеяда блестящих советских ученых — М. В. Келдыш, М. А. Лаврентьев, А. В. Некрасов, В. В. Голубев, П. П. Красильников, В. С. Пышнов, К. А. Ушаков, Л. И. Седов, И. В. Остославский, А. К. Мартынов и многие другие — успешно справилась с задачами, которые были поставлены перед аэромеханической наукой строящимся советским воздушным флотом.

В другом крупнейшем аэродинамическом центре в Геттингене в Германии среди учеников Л. Прандтля мы находим имена известных ныне гидроаэромехаников — Я. Аккерета, А. Бетца, Г. Блазиуса, А. Буземана, Т. Кармана, М. Мунка, Г. Шлихтинга. После второй мировой войны эта школа фактически распалась и уступила место американской аэрогазодинамической школе, тяготевшей к Калифорнийскому технологическому институту. Как глава этой школы Т. Карман, так и многие ее представители — А. Бузман, Л. Крокко, М. Мунк, А. Ферри — были выходцами из Европы, и лишь немногие — К. Милликен, Х. Драйден, Г. Шубауер — коренные янки. К середине XX века сложилась сильная группа английских гидроаэромехаников, воспитанных на трудах О. Рейнольдса, Рэлея и Г. Ламба, — Г. Глауэрт, Ф. Ланчестер, Р. Саусвел, Дж. Тейлор, Л. Хоуарт, М. Лайтхилл и другие.

Трудами всех этих людей и их многочисленных помощников на протяжении нескольких десятилетий XX века была накоплена поистине необозримая информация. И сегодня трудно найти отрасль народного хозяйства, куда эти исследования не внесли бы ясности и, главное, возможности количественной оценки, без которой никакое дело не может считаться поставленным на твердые научные основы.

В аэродинамических трубах и опытовых бассейнах ученые теперь исследуют силы, действующие на самолеты, корабли, автомобили и поезда. Здесь получают данные, необходимые для проектирования мостов, дымовых труб, линий электропередач, мачт, резервуаров. Здесь изучаются снежные заносы, заиливание рек и разрушение их берегов, задымление городов и корабельных палуб. Созданы экспериментальные установки для исследования сил, действующих на летящие в воздухе бумеранги, мячи, шары и другие спортивные снаряды. Анализ атмос-

ферных и океанических вихрей, движение рыб и птиц, спортивная гидроаэромеханика — вот лишь некоторые из новых разделов, где ведется сейчас особо интенсивная работа. Но, как и прежде, в центре внимания ученых-прикладников находятся две главные гидродинамические силы — подъемная сила и сила сопротивления, тайны которых были раскрыты в первые десятилетия нашего века.

Героическая эпоха авиации

В годы первой мировой войны немецкий летчик Г. Лахманн во время учебного полета слишком круто задрал нос самолета, потерял скорость и сорвался в штопор... Лежа после этого в госпитале, он не переставал ломать голову над причиной аварии, пока не понял, в чем дело. Разница давлений над и под движущимся крылом создается лишь до тех пор, пока поток примыкает к поверхности. При малых углах атаки это условие выполняется легко, но при больших — воздух не может удержать контакта с верхней поверхностью крыла и отрывается от нее, не доходя до его задней острой кромки. Такой срыв потока сопровождается резким уменьшением подъемной силы крыла, что нередко связано с катастрофическими последствиями для самолета.

Именно в госпитале Лахманну пришла идея разрезного крыла. Если вблизи передней кромки сделать предкрылок, который при малых углах атаки будет плотно прижат к поверхности, а при больших будет отодвигаться, тогда в образовавшейся между ним и крылом щели возникает скоростной поток воздуха. Если спрофилировать щель так, чтобы этот поток обдувал верхнюю поверхность крыла, то можно будет избежать отрыва пограничного слоя и получить большую подъемную силу даже при уменьшенной скорости полета... Патентные эксперты отвергли заявку Лахманна: как могут дырки в крыле увеличивать его подъемную силу? Л. Прандтль тоже не поддерживал его. Тогда пилот поступил в институт, изучил аэродинамику, построил модель и, наконец, доказал работоспособность своей идеи. Но к этому моменту выяснилось, что в 1919 году патент на подобное устройство получил английский авиаконструктор Ф. Хендли-Пейдж. Возникшие было трения удалось уладить приглашением Лахманна в английскую фирму, а в

1921 году появилась классическая работа С. А. Чаплыгина «Схематическая теория разрезного крыла аэроплана», в которой было показано, что частное изобретение Лахманна тесно связано с магистральной линией развития авиации — неуклонным повышением скорости полета...

Аэродинамикам эта магистральная линия представлялась в виде формулы, принципа: оставлять в потоке воздуха только те части самолета, которые жизненно необходимы для создания подъемной силы или для размещения перевозимого груза. И если внимательно проследить эволюцию самолетных форм в 1920—1940-х годах, нетрудно увидеть, как постепенно отсекалось все ненужное для достижения главной цели — максимальной скорости полета.

Аэродинамики начали с устранения источников завихрения. Еще В. А. Слесарев, выполнявший в Петербургском политехническом институте продувки для первых русских самолетов, убедился в выгодности плавного обтекания наружных стоек и тщательного «зализывания» всех выступов, за которыми могут возникать вихревые следы. Поэтому в начале 20-х годов преобладавшая тогда бипланная схема постепенно облагораживается — уменьшается число стоек и расчалок, круглые стойки заменяются эллиптическими и т. д. Но когда были достигнуты скорости 200—250 км/ч, эти полумеры оказались недостаточными, и на повестку дня стал вопрос о применении более радикальных средств снижения сопротивления.

В 1925 году начались испытания туполевского ТБ-1 — цельнометаллического бомбардировщика с одним свободонесущим крылом без наружных подкреплений. Была доказана принципиальная возможность создания монопланов с весовой отдачей, не худшей, чем в привычных бипланных конструкциях. Однако эта машина не дала сколько-нибудь значительного выигрыша в сопротивлении. И тем не менее именно она положила начало исследованиям, приведшим со временем к значительному качественному скачку в авиации.

Прежде всего: какова наивыгоднейшая форма крыла в плане. Мы уже писали, что с точки зрения снижения индуктивного сопротивления выгоднее всего эллиптическое крыло. Но более сложное в изготовлении и менее прочное конструктивно, оно по мере повышения скорости

теряет свои преимущества перед трапециевидным крылом, ибо при этом индуктивное сопротивление играет все меньшую и меньшую роль по сравнению с сопротивлением трения. Методы расчета трапециевидных крыльев, аэродинамически не уступавших эллиптическим, но более простых и прочных, в середине 20-х годов разработали советские ученые Б. Н. Юрьев, В. В. Голубев и другие.

К середине 30-х годов вихревое и индуктивное сопротивление крыльев было практически сведено к минимуму, и на первое место выдвинулось исследование сопротивления трения, составлявшего у лучших образцов около 70—80% всего сопротивления. Еще в 1926 году А. К. Мартынов, продувший в большой трубе ЦАГИ натуральный фюзеляж самолета Ньюпор, показал, какую большую роль в лобовом сопротивлении играют «мелочи» — небольшие выступы, отверстия, швы обшивки. В середине 30-х годов А. А. Дородницын, К. К. Федяевский и Л. Г. Лойцянский распространили этот вывод и на крылья, лобовое сопротивление которых, как выяснилось, сильно зависело от гофров, шероховатостей обшивки и даже полукруглых головок заклепок.

Анализ процессов, происходящих на поверхности, обтекаемой воздухом, навел исследователей на мысль, что можно создать такие формы крыла и фюзеляжа, на которых удастся предотвратить возникновение турбулентности, увеличить протяженность ламинарного пограничного слоя и тем самым снизить сопротивление трения. В 1938 году И. В. Остославский и К. К. Федяевский разработали первые в нашей стране ламинизированные профили крыльев, коэффициент сопротивления которых был в два раза ниже, чем у ранее применявшихся профилей. Тем временем Г. П. Свищев вел исследования по ламинизированным обводам фюзеляжей.

В результате менее чем за двадцать лет сопротивление, например, истребителей удалось снизить в десять раз, а их скорость увеличить почти в три раза. За все эти блестящие достижения пришлось бы расплачиваться резким ухудшением взлетно-посадочных характеристик скоростных самолетов, если бы не изобретение Лахманна и фундаментальная теоретическая работа С. А. Чаплыгина по разрезным крыльям...

Как упоминалось ранее, еще в 1904 году Л. Прандтль доказал, что главная причина как резкого падения

подъемной силы, так и увеличения лобового сопротивления крыла при больших углах атаки — отрыв пограничного слоя от верхней поверхности, образование широкой вихревой зоны с пониженным давлением за крылом. Если же каким-то путем удержат поток у поверхности, не дать ему оторваться от нее, можно получить значительное увеличение подъемной силы на том же самом крыле. Лахманн предложил для этой цели предкрылок, направляющий вдоль верхней поверхности высокоскоростную струю воздуха, которая, ускоряя заторможенный пограничный слой, не дает ему оторваться от крыла. Но, как выяснилось, это была не единственная возможность.

Исследования С. А. Чаплыгина, В. В. Голубева, Н. С. Аржаникова и эксперименты Ф. Г. Гласса, П. П. Красильщикова, К. А. Ушакова и других, проведенные в 1930—1934 годах, показали, что того же результата можно достичь, например, с помощью закрылков и носков, отклонением которых удастся менять кривизну профиля. Делая между этими поворотными частями и неподвижным крылом щели, в которых ускоряется воздух, сдувающий пограничный слой с верхней стороны крыла, можно достичь безотрывного обтекания. Тогда же А. К. Мартынов провел экспериментальное исследование так называемых щитков — пластин, помещавшихся на нижней задней поверхности крыла и отклонявшихся вниз для увеличения его максимальной подъемной силы. В отличие от закрылков щиток образовывал за собой заполненную вихрями пазуху, в которой возникало разрежение. Соединяя пазуху отверстиями или щелями с верхней стороной крыла, можно было отсасывать заторможенный пограничный слой, прижимать его к поверхности кормовой части крыла, не давая ему отрываться и тем самым увеличивать подъемную силу крыла.

Так, кроме классических элеронов, для создания кренов на крыльях самолетов появляется целый комплекс устройств для регулирования их подъемной силы и лобового сопротивления: щитки, закрылки, носки и предкрылки для получения высокой подъемной силы при пониженных скоростях полета; воздушные тормоза (они отклоняются от крыла и становятся поперек потока, резко увеличивая сопротивление и гася скорость самолета); концевые шайбы и аэродинамические ребра для снижения индуктивного сопротивления и др. В результа-

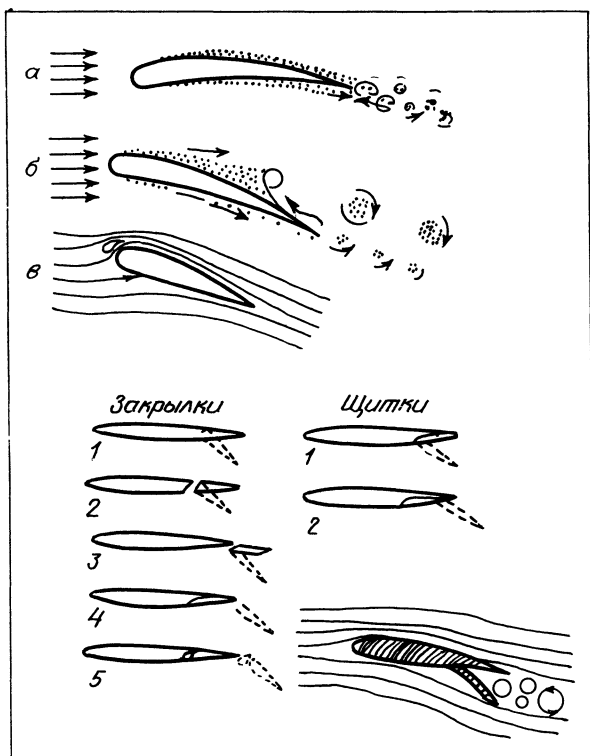


Рис. 61. Механизация крыла. Вверху — обтекание крыла потоком воздуха. Образование вихрей на малых углах атаки (а); образование вихрей и срыв потока на больших углах атаки (б); предотвращение отрыва потока на больших углах атаки с помощью предкрылка (в).

Закрылки: простой (1), щелевой (2), подвешной (3), выдвижной (4); двойной выдвижной (5). Щитки: простой (1), со скользящим шарниром (2). Внизу — работа крыла с щитками

те крыло современного самолета превратилось в настоящую машину для создания подъемной силы и регулирования ее в широком диапазоне скоростей полета.

Не меньшего объема работ потребовало и исследование хвостового оперения, шасси, моторных гондол, систем воздушного и водяного охлаждения. И без накопления всей этой разнообразной и обширной информации

было бы немыслимо создание современной авиации, была бы немыслима та революция, которую совершил приход в авиацию реактивных двигателей...

Снова ветер

По странной иронии судьбы парусный флот агонизировал в начале XX века, как раз в то время, когда в аэромеханических лабораториях мира разворачивались исследования, способные возродить ветроходы. Тогда нужды авиации и флота стимулировали интенсивные работы в области гидро- и аэромеханики, и в этой спешке никто как-то не задумался всерьез о возможности возрождения парусного флота на новой основе. Никто, кроме голландского инженера А. Флеттнера.

Сейчас трудно с уверенностью сказать, что заставило этого галантливого изобретателя с таким упорством биться над разработкой ветровых движителей, представлявшихся в то время совершенно бесперспективными. Некоторые даже склонны считать, что Флеттнеру просто была невыносима мысль об отказе от ветра как источника движущей силы для кораблей. Однако труды Флеттнера говорят о другом: он, как никто другой, понимал выгоду, удобство и перспективность ветра для флота. Появившись в 1922 году в лаборатории Л. Прандтля в Геттингене, он проанализировал десятки предложений, сделанных до него. Он сам испытал лодку с металлическим вертикальным крылом вместо паруса, прежде чем остановился на эффекте Магнуса.

Запатентованное в 1923 году судно Флеттнера было, по сути дела, не чем иным, как увеличенной в сотни раз тележкой, с которой в середине XIX столетия экспериментировал берлинский профессор. Спустя три года появилось необычное судно: на шхуне «Букау» Флеттнер установил два вертикальных ротора вместо мачт. Высота каждого ротора 13 м, диаметр 3 м. Два электродвигателя вращали эти барабаны со скоростью 750 об/мин. Когда ветер набегал на вращающийся цилиндр, на нем возникала магнусова сила, которая и двигала корабль. При площади сечения роторов в десять раз меньшей, чем поверхность парусов, «Букау» развивала скорость 8—10 узлов (15—18 км/ч).

Первые опыты, казалось, подтвердили мнение Флеттнера: переименованная в «Баден-Баден», «Букау» со-

вершила несколько плаваний вокруг Европы, а в 1926 году пересекла Атлантику. Этот успех привел к постройке нескольких роторных яхт и более крупного судна «Барбара» водоизмещением 2077 т. На нем было три ротора, и оно в течение нескольких лет плавало из Гамбурга в Средиземное море. Но постепенно энтузиазм, вызванный появлением роторных судов, стал затихать. Эксплуатация вскрыла их неустранимые недостатки. Для вращения роторов были нужны механические двигатели и запасы топлива, поэтому роторные суда не имели неограниченной дальности плавания, как обычные парусники. А поскольку главной движущей силой для них был ветер, они не могли ходить точно по расписанию, как пароходы. В 30-е годы, когда разразился кризис, флеттнеровские корабли пошли на слом.

Однако мысль о ветроходах не умерла: в 1960 году начали появляться проекты парусников, сулящих экономии не столько на топливе, сколько на количестве членов экипажа. В самом деле, одним из недостатков старого парусного флота было то, что для управления парусами требовалась многочисленная и хорошо обученная команда. Поэтому некоторые изобретатели направили свои усилия на разработку устройств, с помощью которых капитан мог бы управлять судном сам, не спускаясь с мостика. То были раздвижные или вытягивающиеся паруса на поворотных мачтах, которые могли быть поставлены за 20—30 с.

Энергетический кризис, увеличивший цены на нефть, и ужесточение требований к системам очистки, связанных с защитой окружающей среды, в 1970-х годах дали новый импульс в создании современных парусников. В этом направлении сейчас ведутся работы в Николаевском кораблестроительном институте (СССР), в Институте корабельной архитектуры Гамбургского университета (ФРГ), в Университете Ньюкасла на Тайне (Англия) и др. Здесь разработали проекты крупных судов грузоподъемностью в несколько десятков тысяч тонн, которым аэродинамическая сила, создаваемая ветром на парусах, способна сообщать скорость до 15—16 узлов. Но возможности паруса в этих проектах не раскрываются до конца.

В отличие от всех остальных движителей парус феноменально универсален. Увеличивая количество парусов и меняя их расположение, можно получать как большую

тягу при малой скорости, так и малую тягу при большой скорости. Но удивительнее всего то, что, когда ветер дует перпендикулярно или под острым углом к курсу судна, парус создает небольшую тягу даже при скоростях движения, превышающих скорость самого ветра! И здесь скрыта не просто теоретическая возможность. Давно известно, например, что буера, сопротивление которых ничтожно и почти не зависит от скорости движения, мчатся иногда в полтора-два раза быстрее ветра. Вот почему центральный вопрос в современном «ветроходстве» не только и не столько сами движители, сколько снижение гидродинамического сопротивления корпуса корабля...

В начале 1950-х годов английскому инженеру Х. Баркла парусник XX века представлялся в виде сплющенного фюзеляжа крыловидного профиля, покоящегося на трех глиссирующих корпусах. Эти разнесенные на большое расстояние корпуса создают судну огромную остойчивость. Над палубой возвышается поворотная колонна с четырьмя крыльями и килем. Поверхность крыльев около 40 кв. м. Общий вес парусника 750—1000 кг. В отличие от парусов крыльями легче управлять и у них гораздо меньшее сопротивление. Благодаря этому при ветре 25 узлов тримаран Баркла теоретически должен мчаться 37-узловым ходом, а при 30-узловом ветре скорость судна должна стать фантастической — 56 узлов!

В конце 1960-х годов эта идея была более обстоятельно проработана англичанами Дж. Уокером и Х. Мюрреем, создавшим проект 16,5-метрового тримарана «Плэйнсэйл», который должен приводиться в движение неким подобием коробчатого змея. Этот «змей» устанавливается над корпусом и состоит из трех вертикальных крыльев и киля. Исследования в аэродинамической трубе показали, что в такой решетчатой конструкции крылья работают эффективнее, чем стоящие в одиночку: подъемная сила на 10% больше, а сопротивление на 30% меньше. Появилось немало и других проектов, в основе которых лежит одно существенное требование: резкое снижение сопротивления корпуса...

На стыке двух стихий

В 1926 году известный советский кораблестроитель, участник Цусимского сражения, революционер В. П. Костенко опубликовал небольшую работу «Сопротивление

воды движению судов», в которой писал: «На природу волнового сопротивления установился такой же взгляд, как в отношении трущегося сопротивления: его считают универсальным законом природы, столь же присущим движению тел и судов по поверхности воды, как и трение... не подозревают, что волнообразование есть лишь следствие применяемых ныне геометрических форм судов, делающих неизбежным нарушение равновесия поверхности воды...» И далее он набросал план исследований многокорпусных судов — катамаранов и тримаранов, которые должны были, по его мнению, иметь меньшее волновое сопротивление, чем классические однокорпусные корабли.

Эксперименты подтвердили правоту В. П. Костенко лишь частично: увеличение подводной поверхности у многокорпусных кораблей приводило к такому росту сопротивления трения, которое перевешивало выигрыш от снижения волнового сопротивления. Лишь при скоростях, превышающих 22—24 узла, суммарное сопротивление тримарана становилось меньше, чем у одно- и двухкорпусных конструкций. Но призыв Костенко искать кардинально новые формы и новые методы снижения сопротивления — в первую очередь волнового — был своевременным. С середины 1920-х годов во всем мире ведутся интенсивные исследования процессов глиссирования — скольжения по поверхности воды, движения крыльев под водной поверхностью и над экраном, движения на воздушной подушке.

Первые эксперименты с глиссирующими корпусами в своем бассейне в Торкее провел еще У. Фруд. Один из них — он был предложен неким К. Рамусом — представлял собой длинный корабль, состоявший в профиле как бы из двух плоских клиньев, в месте стыка которых возникал резкий уступ. По мысли изобретателя, на большой скорости клинообразные днища должны были выталкивать корпус из воды, и после этого он должен был скользить на нескольких точках, испытывая ничтожное сопротивление. Исследования Фруда в 1872 году не подтвердили этих предположений, и форма Рамуса была забракована. Неудачной оказалась и трехпоплавковая модель самого Фруда, идея которой возникла у него во время исследования рамусовой формы. И это надолго охладило интерес ученых к проблемам глиссирования.

Лишь в середине 1920-х годов, когда были созданы

мощные и легкие авиационные моторы, стала ясна причина фрудовских неудач: преимущество глиссирующих корпусов могло проявиться только при высоких скоростях, которые даже представить себе не могли кораблестроители прошлого века. Именно к этому времени относятся первые теоретические исследования простейших задач глиссирования, выполненные англичанами Дж. Рэлеем и Г. Лэмбом и голландцем Е. Хогнером. Наконец, в 1930-х годах немецкий гидродинамик Г. Вагнер и советский ученый Л. Седов разработали фундаментальную теорию глиссирования.

В ней глиссирующая поверхность рассматривается как некое «полукрыло», обтекаемое жидкостью только с нижней стороны. При этом подъемная сила, индуктивное и фрикционное сопротивление получают примерно вдвое меньше, чем у крыла, а волновое сопротивление тем больше, чем меньше скорость движения. Таким образом, сразу прояснилось преимущество глиссеров именно при высоких скоростях, чем и объясняется интенсивное строительство быстроходных глиссеров в начале 30-х годов. Но хотя именно на глиссере «Блюберд II» английский гонщик М. Кемпбелл в 1939 году установил рекорд скорости на воде — 226 км/ч, — опыт показал, что их практическая ценность снижается из-за чрезвычайной чувствительности к малейшему волнению на море. Вот почему внимание кораблестроителей в конце 30-х — начале 40-х годов закономерно переключается на подводное крыло.

Исследования в этой области велись с конца XIX века, но первый крупный успех был достигнут только с появлением авиамоторов: в 1920 году американец А. Белл — изобретатель телефона — построил катер на подводных крыльях с двумя воздушными пропеллерами, который установил тогдашний рекорд скорости на воде — 114 км/ч. Однако глиссеры на время отвлекли внимание исследователей от подводного крыла, и только после второй мировой войны был достигнут успех — блестящие конструкции «Ракет», «Комет» и «Метеоров», созданные советским кораблестроителем Р. Е. Алексеевым, вывели нашу страну на одно из первых мест в мире в этой области.

Глиссеры и суда на подводных крыльях еще сохраняют связь с водной стихией. Следующий шаг — полный отрыв от водной поверхности. Здесь возможны два пути:

создание воздушной подушки и использование эффекта близости экрана — водной или земной поверхности.

«Еще в середине 1924 года... Константин Эдуардович Циолковский говорил мне, что у него родилась мысль о бесколесном вездеходе, лежащем на воздушной подушке, — вспоминал известный советский ученый, основоположник гелиобиологии профессор А. Л. Чижевский. — Говорил с увлечением и показывал примитивный чертеж нового автомобиля». А спустя 10 лет началось испытание первого советского судна на воздушной подушке Л-1, спроектированного профессором В. И. Левковым. Спустя еще три года более совершенный аппарат Л-5 весом в 9 т развил на мерной миле рекордную скорость — 135 км/ч! Так выглядела одна из первых попыток оторваться от водной — да и не только от водной — поверхности...

В 1923 году Б. Н. Юрьев опубликовал работу «Влияние земли на аэродинамические свойства крыла». После него исследованием этой проблемы занимались Б. А. Ушаков, С. Н. Насилов, Я. М. Серебрянский, Ш. А. Биячурев, Б. Т. Горощенко, А. И. Смирнов, Г. И. Костычев. За рубежом влияние экрана на крыло изучали А. Бетц, Л. Прандтль, Е. Пистолези и другие. Выяснилось, что при движении крыла вблизи экрана — водной или земной поверхности — давление под ним получается больше, чем при полете на большой высоте. Благодаря этому возрастала подъемная сила, в то время как лобовое сопротивление почти не менялось. Именно это открытие и легло в основу многочисленных проектов экранопланов, которые строились и испытывались во всем мире с середины 1930-х годов.

Таким образом, стремление оторвать судно от поверхности воды привело к значительному увеличению скоростей движения. Подводные крылья позволили в среднем достичь 80—90 км/ч, глиссирование — 90—100, воздушная подушка — 110—150, экранный эффект — 200—220 км/ч. Для сравнения укажем, что лучшие показатели для водоизмещающих кораблей — 65—75 км/ч.

Однако все эти приемы снижения сопротивления пригодны только для небольших судов, водоизмещение которых не превышает нескольких сот тонн. Для более крупных кораблей специалисты предлагают другой, более радикальный путь снижения сопротивления — уход под воду. Еще Борда установил, что сопротивление

вполне погруженного тела растет медленнее, чем движущегося на поверхности воды. Но для практики это наблюдение представляло чисто умозрительный интерес: в распоряжении техники не было двигателей, способных работать без атмосферного кислорода. Только появление атомных установок, не нуждающихся в воздухе, позволило реализовать другой путь снижения сопротивления — подводные лодки, которые, идя на большой глубине, вообще не испытывают волнового сопротивления...

К сожалению, и у этого решения есть свои минусы. Во-первых, возрастает сопротивление трения за счет увеличения смоченной поверхности подводной лодки, что уменьшает выигрыш, даваемый устранением волнового сопротивления. Во-вторых, атомная установка гораздо дороже хорошо отработанных и проверенных двигателей, работающих на жидком органическом топливе. В-третьих, подводные грузовые суда, сопоставимые с ныне существующими надводными, не смогут проходить через многие проливы и каналы. Вот почему способы снижения сопротивления обычных водоизмещающих торговых судов по-прежнему остаются в центре внимания судостроителей всего мира...

В поисках новых путей снижения сопротивлений

Когда в 1929 году конструкторы французской фирмы Пеноэ стали проектировать новый рекордно быстроходный трансатлантический лайнер, они взяли за прототип корпус традиционного парохода «Иль-де-Франс». Но при испытаниях модели на повышенной скорости носовая волна поднялась почти до верхней палубы, а потребная мощность получилась чрезмерно высокой. Вот почему они с недоверием отнеслись к новой идее эмигранта из России В. И. Юркевича, предложившего чертежи корпуса будущего судна, разработанные на основе его метода. Каково же было их изумление, когда из пятнадцати моделей, испытанных в Гамбургском опытовом бассейне, наилучшие результаты показала модель, сделанная без всяких изменений и дополнений по чертежам Юркевича. Именно по этой модели, именовавшейся в отчетах бассейна «неулучшаемой», и был построен корпус знаменитой «Нормандии».

В чем же заключался секрет «формы Юркевича»?

Оказывается, он первым нашел способ подавления носовой системы волн. В то время как заостренная носовая оконечность с глубокими впадинами на скулах легко рассекала воду на поверхности, не давая возникнуть сколько-нибудь значительному возвышению воды, образующему гребень волны, бульбообразная подводная часть была спроектирована так, чтобы направлять находящиеся под ней слои воды вверх, к тому месту корпуса, где должны были бы образовываться впадины поперечных волн. Благодаря такому подавлению волновая система получалась вялой, не столь мощной, как у судов обычных форм, а это и приводило к снижению волнового сопротивления.

«Особенность «Нормандии» по сравнению с другими судами та, — писал Юркевич, — что у нее совсем почти нет носовой волны, и, кроме того, весь корпус окружен слоями эмульсии, доходящими почти до самого носа, тогда как у обычных судов носовая волна смыкает этот слой в передней части и этим увеличивает трение... Другая особенность — необыкновенно большая ширина корпуса — 36 м — по сравнению с другими большими лайнерами, у которых она редко превышала 30,5 м. В те годы все были убеждены, что для увеличения скорости хода необходимо требуется уменьшение ширины миделя. «Нормандия» была разительным доказательством противоположного: при большей ширине в сочетании с новой формой носовой части скорость ее была увеличена, а потребная пропульсивная мощность уменьшена». И действительно, «Нормандия» развивала скорость выше 30 узлов при мощности 160 тыс. л. с., а лайнеру традиционной формы требовалась для этого мощность 180 тыс. л. с.!

Юркевич считал, что изобретенная им бульбовая форма носа пригодна только для сравнительно острых и быстроходных судов. Но значение и применение его идеи оказалось значительно шире. В 1962 году японский гидродинамик Т. Инуи установил, что хорошо развитый носовой бульб, установленный на быстроходных судах сравнительно полных обводов, дает снижение общего сопротивления на 15% за счет взаимного погашения волн, создаваемых бульбом и корпусом. А лет десять спустя бульбовые формы применялись уже и на судах очень полных обводов и не очень высоких скоростей. Причем снижение сопротивления достигалось за счет заострения носовых обводов основного корпуса, автоматически по-

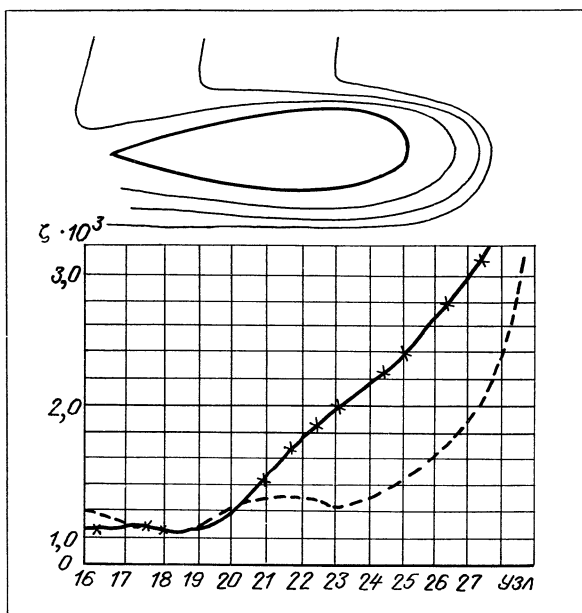


Рис. 62. Зависимость волнового сопротивления для корабельного корпуса с бульбом (пунктирная линия) и без бульба (сплошная линия). Выигрыш очевиден — при скорости 27 узлов волновое сопротивление корпуса с бульбом в полтора раза меньше, чем у корпуса без него

лучающегося при применении бульба таранного типа. На советском танкере «Рихард Зорге» таким путем удалось увеличить скорость на 0,75 узла по сравнению с предшествующим танкером «София».

Дальнейшим развитием этой идеи стали суда «сигарного» типа: их подводная часть приближалась к форме хорошо обтекаемого каплеобразного тела или сигары, которая соединялась с широкой надводной частью узким, острым, хорошо рассекающим воду участком корпуса. Логически завершили эту линию развития полупогруженные суда, состоящие из легкого надводного корпуса, который поддерживается на плаву двумя полностью погруженными обтекаемыми корпусами, соединенными с надводным корпусом стойками.

Исследования показали, что такое судно практически

не испытывает волнового сопротивления, зато сопротивление трения из-за увеличения смоченной поверхности возрастает почти в два раза. Отсюда ясно, как важно найти надежные методы снижения сопротивления трения...

В конструкции «Нормандии» оно частично снижалось за счет водовоздушной эмульсии, возникавшей в носовой части, которая, обволакивая корпус, меняла плотность и вязкость среды, примыкавшей непосредственно к обшивке. Возникла мысль искусственно увеличить этот эффект, нагнетая воздух под днище судна. Первые такие эксперименты, проведенные в 1904—1905 годах американским гидродинамиком Д. Тейлором, дали обескураживающий результат: сопротивление судна при поддуве не убывало, как ожидалось, а, наоборот, возрастало, причем воздух не образовывал примыкающую к обшивке плену, а создавал облако пузырьков, не контактирующих с поверхностью корабля...

Лишь позднее, когда плоские участки днища стали отделять от скругленных скул продольными килями, удалось получить устойчивые воздушные каверны. В конце 1960-х годов в Советском Союзе в опытной эксплуатации находился крупный речной теплоход «Волго-Дон» водоизмещением 6430 т, на котором с помощью поддува воздуха под днище удалось снизить сопротивление трения на 20%! Более неожиданные и интересные результаты были получены в начале 60-х годов в ходе обсуждения так называемого «парадокса Грея».

В 1935 году английский зоолог Дж. Грей — один из пионеров изучения механизма движения животных — попытался оценить мощность мышц дельфина. Исходя из рассказов моряков и натуралистов, он принял скорость движения дельфина равной 20 узлам. После этого Грей вычислил мощность, которая необходима для движения с такой скоростью твердому телу, в точности совпадающему по форме и размерам с телом дельфина. Она оказалась равной 2,6 л. с. Какие же мускулы нужны дельфину, чтобы развить такую мощность? За неимением более достоверных данных Грей принял, что мышцы дельфина не отличаются от мышц человека или собаки, которые способны развивать около 0,02 л. с. на килограмм веса. Отсюда вес мышц дельфина получался равным 120 кг, а в действительности он в десять раз меньше!

После споров и обсуждений ученые осознали, что па-

радокс Грея порожден не произвольно принятыми допущениями, а аномально низким сопротивлением тела движущегося дельфина. Для объяснения этой аномалии было предложено множество гипотез, но ни одна из них не вызвала столько споров и недоразумений, сколько гипотеза М. Крамера...

Во многих статьях описывалось, будто бы немецкий гидродинамик М. Крамер, пересекая на пароходе Атлантику, заинтересовался дельфинами, шутя обгонявшими лайнер. Пораженный этим, он будто бы стал изучать строение их кожи и обнаружил, что она способна гасить завихрения воды за телом движущегося дельфина, а потому и снижать его сопротивление. Не удовлетворившись решением чисто академической задачи, Крамер будто бы задумался о применении этого принципа в кораблестроении и изобрел эластичное покрытие, которое копировало строение кожи дельфина и снижало сопротивление обшитых им судов. Так будто бы и родилось покрытие «ламинфло», в два раза снижающее сопротивление движущихся в воде тел.

Увы, в действительности все было совсем наоборот. В 1938 году молодой инженер получил германский патент на «метод снижения сопротивления трения». Тонкие, тесно расположенные на поверхности движущегося тела проволочки натягивались вдоль потока. По мысли автора, трение жидкости в зазорах между проволочками должно было гасить турбулентные вихри, образующиеся при обтекании, и сохранять пограничный слой ламинарным.

Спустя несколько лет Крамер действительно заинтересовался быстроходностью дельфинов. Раздобыв несколько кусков дельфиньей кожи, он попытался объяснить ее строение с точки зрения своего патента. Свое рассуждение Крамер заключает осторожной фразой: «Если это объяснение правильно, то кожа дельфина представляет собой устройство, с помощью которого заглушение возмущений потока на стенке происходит на всей поверхности тела дельфина...»

Таким образом, с изобретения Крамера следует удалить бионический ореол и оценить его по достоинству: это была первая попытка снизить сопротивление трения путем ламинаризации пограничного слоя. По мысли изобретателя, покрытие должно состоять из трех слоев резины общей толщиной 2—3 мм. Верхний слой — глад-

кий — воспринимает давление набегающего потока. Второй — эластичный с гибкими вертикальными столбиками заполнен демпфирующей силиконовой жидкостью. Третий — тоже гладкий — примыкает к корпусу. Развивающиеся при турбулизации потока поперечные вихри, передавая свою энергию деформирующейся стенке и рассеивая ее в демпфирующей жидкости, гасятся, и благодаря этому пограничный слой остается ламинарным на большей части поверхности тела.

Эксперименты показали, что сопротивление трения тел, покрытых ламинфлю, снижается на 15—45% по сравнению с жесткой моделью. Однако практическое использование этого изобретения затруднено быстрым старением резины. Кроме того, ламинфлю подвержено обрастанию морскими организмами. Поэтому более практичным представляется специалистам другой способ снижения сопротивления трения — введение полимерных добавок в пограничный слой.

В 1948 году английский химик Б. Томс обнаружил удивительный эффект: при добавлении в воду ничтожных количеств некоторых полимеров — меньше 0,001% по весу — ее гидродинамические свойства поразительным образом меняются. Пока режим течения ламинарный, раствор ведет себя точно так же, как чистый растворитель. Но как только течение начинает турбулизироваться, раствор гасит возникающие в нем вихри. В результате ламинарное течение в нем сохраняется при гораздо более высоких скоростях, а потому при прочих равных условиях сопротивление жидкости с добавкой полимера получается гораздо меньше, чем у чистой воды. В одном из опытов пять десятитысячных процента полимера снизили сопротивление на 65%! Большие металлические шары падают в таком растворе быстрее, чем в чистой воде. На перекачку его требуется гораздо меньшая мощность, чем на перекачку воды, и т. д.

Многочисленные опыты в середине 1960-х годов, проводившиеся как у нас в стране, так и за рубежом, показали, что применение полимеров — один из самых реальных методов снижения сопротивления трения на 25—50%!

В отличие от кораблестроения и авиации в наземном транспорте на аэродинамику долгое время не обращали особого внимания. И это понятно: при скоростях 20—30 км/ч на преодоление аэродинамического сопротивле-

ния затрачивалось не более 15—24% мощности мотора. Однако уже при скорости 80 км/ч эта величина достигает 50%, а при 110 км/ч — 70%.

Вот почему по мере увеличения скоростей автомобиля растет и интерес проектировщиков к поиску наиболее рациональных форм кузова. Исследование в аэродинамических трубах показало, что коэффициент сопротивления типичного автомобильного кузова был снижен с 0,95—1,0 до 0,45—0,5. Систематические же продувки убедили в том, что в принципе эту величину можно довести до 0,12, если придать кузову идеально обтекаемые формы.

Одним из неожиданных результатов аэродинамических исследований автомобилей было то, что у них кроме сопротивления удалось обнаружить весьма ощутимую подъемную силу! Наибольшей она оказалась у форм, близких к «фольксвагену» — у него коэффициент подъемной силы достигает 0,5, больше, чем коэффициент сопротивления! Вот почему на гоночных автомобилях для сохранения хорошего сцепления с дорожным покрытием приходится устанавливать сверху небольшие крылья с отрицательным углом атаки, которые прижимают машину к грунту.

Забытый эффект аэродинамики

Ясным декабрьским днем 1910 года в Иси ле Мулино под Парижем собралась небольшая группа зрителей, желающих увидеть первый полет необычного аэроплана, привезенного на авиационный салон молодым румыном А. Коанда. Даже неспециалисту бросалась в глаза необычная конструкция этого аппарата. Полотно, почти обязательный материал для обшивки плоскостей, Коанда заменил тонкой фанерой. Из нее же сделан и желобообразный фюзеляж, и крылья, и хвостовое оперение. Это позволило конструктору отказаться от межкрыловых стоек, расчалок и натяжных приспособлений, характерных для самолетов тех лет. Но больше всего зрителей изумляло отсутствие пропеллера. Вместо него в носовой части громоздилось необычное сооружение, напоминавшее своей формой усеченный конус, который сам Коанда называл «турбиной» и который мы могли бы смело назвать воздушно-реактивным двигателем...

Воздух засасывался центробежным компрессором, сжимался и попадал в камеры сгорания, где в него

впрыскивалось топливо. Отсюда сжатый газ через два сопла по бокам фюзеляжа вырывался наружу, создавая реактивную тягу. В этом двигателе не было только газовой турбины: вместо нее бензиновый мотор мощностью 50 л. с. приводил в действие компрессор.

При испытаниях на стенде этот мотокомпрессорный двигатель развил тягу 220 кг, и Коанда считал, что этого будет вполне достаточно для взлета аппарата весом 420 кг. Заняв место пилота в желобе фюзеляжа, Коанда запустил мотор. Из сопел по бокам вырвались языки пламени, и самолет начал разбег. Он долго бежит по полю и лишь в нескольких десятках метров от городской стены тяжело отрывается от поверхности, переваливает через стену и хрястко втыкается в землю.

Через несколько минут отделавшийся ушибами изобретатель принимает первые поздравления. «Молодой человек! Вы опередили эпоху на 30, а то и на все 50 лет!» — сказал ему тогда А. Эйфель. Но мысли Коанда во время всех этих поздравлений были заняты другим: странным поведением языков пламени, вырывавшихся из реактивных сопел во время разбега самолета...

Еще во время предварительных испытаний Коанда заметил, что пламя из реактивных сопел может поджечь фанерный фюзеляж. Поэтому он установил металлические щитки, которые отражали бы языки пламени. Но когда самолет начал свой разбег, Коанда с изумлением увидел: щитки, вместо того чтобы отражать пламя, наоборот, присасывают его к фюзеляжу...

Как только представилась возможность, изобретатель встретился с фон Карманом, который быстро оценил важность сделанного молодым румыном открытия и даже дал ему название «эффект Коанда». Но почему-то вновь открытый эффект не привлек к себе внимания аэродинамиков, и в течение 25 лет Коанда — довольно известный авиаконструктор — в свободное от работы время в одиночку ставил эксперименты и искал своему открытию возможные области применения.

С эффектом Коанда мы сталкиваемся каждый день. Как часто досаждают мы на то, что струйка наливаемого в блюдце чая вдруг прилипает к верхней поверхности чашки и льется мимо блюдца на стол! Такое прилипание струи к твердой поверхности и есть проявление эффекта Коанда. Искусно подбирая форму обтекаемой жидкостью или газом поверхности, можно изменять на-

правление струи и даже поворачивать ее в обратную сторону. Коанда экспериментально установил, что изгибаемая воздушная струя засасывает воздух из окружающей среды, и его количество может в двадцать раз превышать количество воздуха в самой струе. Наконец, Коанда измерил давление в разных точках обтекаемой поверхности и установил, что оно ниже атмосферного. А это значит: на такой поверхности атмосферное давление создает силу, способную двигать или поднимать аппарат. Если разместить устройство в верхней части, можно получить подъемную силу без всяких движущихся частей.

Эти выводы настолько противоречили общепринятым взглядам, что большинство аэродинамиков долгое время воспринимало их скептически. Интерес к исследованиям Коанда пробудился было после войны, когда в немецких архивах нашли сведения о том, что немцы изучали этот эффект в своих аэродинамических лабораториях и считали его заслуживающим внимания. Часть повторных экспериментов как будто подтвердила существование эффекта. Однако ряд исследователей считали, что эффект не воспроизводится, и интерес к нему был снова утрачен.

Появление аппаратов на воздушной подушке побудило исследователей вновь обратиться к эффекту Коанда. И здесь-то, наконец, выяснились причины столь резких прежних расхождений. Оказалось, что стабильный эффект возникает при строго определенном соотношении размера щели и диаметра сопла, что огромное влияние оказывает место расположения щели, шероховатость и форма поверхности. Не удивительно, что многие исследователи, работавшие с примитивными моделями, зачастую вообще не обнаруживали эффекта. Наибольший опыт накопил в этой области сам Коанда. В 1963 году 77-летний изобретатель во время посещения одной из американских лабораторий продемонстрировал своим коллегам, какие возможности таит открытый им эффект.

В то время сопла Коанда уже устойчиво создавали тягу, равную тяге обычных реактивных сопел. Во время осмотра лаборатории, подойдя к модели одного из таких сопел, Коанда сложил вокруг него ладони трубочкой, и приборы показали увеличение тяги! Больше того, Коанда посоветовал более тщательно подобрать хвостовую оконечность. Последовав этому совету, американ-

цы получили сопло с тягой, на 19% превышающей теоретическую тягу реактивного сопла. В других экспериментах удавалось повысить тягу на 38% сверх теоретической.

Изучение эффекта Коанда — не отвлеченные теоретические изыскания. Вот модель аппарата на воздушной подушке. Ее диаметр около 60 см. Верхняя часть — эллиптический тороид — сверху прикрыта крышкой так, что между поверхностью тороида и крышкой получается щель, из которой истекает воздух. Вопреки всем канонам воздух из щели вытекает вверх под углом в 45° к горизонту. И тем не менее вакуум, создаваемый струей в верхней части, и подпор под днищем, куда она стекала по выпуклой внешней поверхности, отрывали аппарат от земли и заставляли его парить в воздухе. Судя по модели, такие аппараты потребуют меньшей мощности, будут легче по весу и проще в управлении, чем обычные аппараты на воздушной подушке.

А вот другая модель — судно на подводных крыльях. Вместо винтов в передней части подводных крыльев сделаны щели, через которые выбрасываются струи воды. Они не только создают подъемную силу, но и сообщают судну движение вперед. Эта модель длиной 120 см и весом 10 кг развивает скорость до 32 км/ч. Она может полностью выходить из воды и двигаться на подводном крыле даже при небольших скоростях. Подводное крыло с двигателем Коанда не создает больших волн, брызг, меньше шумит. Ученые ожидают, что натурный образец разовьет скорость в 80 узлов при меньшей мощности двигателей, чем на обычных судах на подводных крыльях.

Сам Коанда тоже сделал немало изобретений, в которых используется открытый им эффект. Например, в 1938 году он запатентовал интересное устройство — струйный зонт. Образно говоря, это крыло самолета, свернутое в диск так, что получается как бы зонт или гриб с отверстием в центре. Если в верхней части через несколько отверстий с большой скоростью выбрасываются газовые струи, то они, обтекая выпуклую поверхность и срываясь с нижнего края, создают пониженное давление над зонтом. В результате на нем возникает подъемная сила, поднимающая его в воздух.

Уже сейчас сопла Коанда применяют в камерах сгорания — они дают яркое голубое пламя, без дыма, с

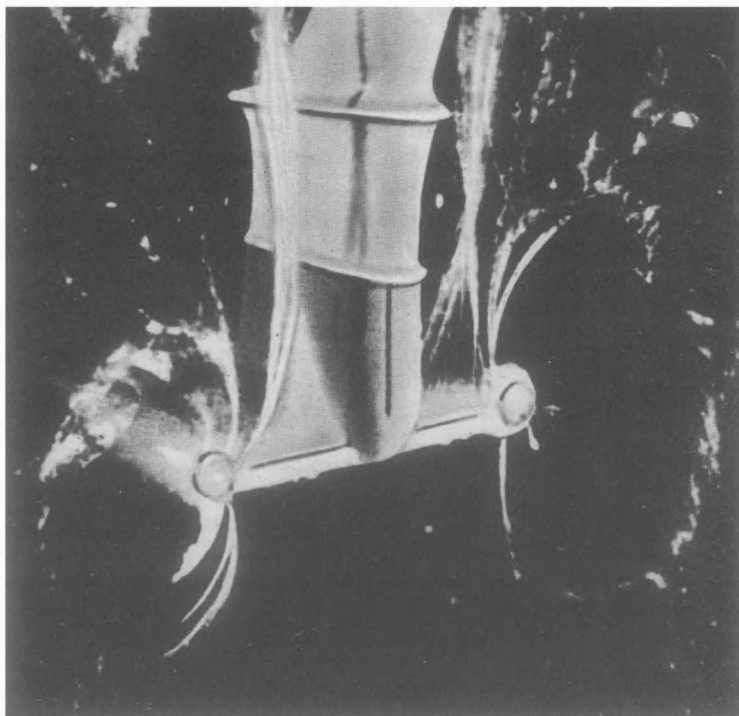


Рис. 63. Движитель без движущихся частей для судна на подводных крыльях. Работа этого движителя основана на использовании эффекта Коанда

полным сгоранием топлива. Иногда большую часть воздуха, необходимого для окисления, такое сопло присасывает из окружающей среды. Возможны и другие практические применения: например, румынские ученые пробуют применить этот эффект для торможения самолетов при посадке и для глушения шума реактивных двигателей.

Как опасно возмущать потоки

Редкий труд по теории надежности обходится ныне без фотографии последовательных фаз разрушения знаменитого Такомского моста в США. Они публиковались

так часто, что мы уже привычно скользим по ним взглядом, не задумываясь, как были сделаны эти снимки. Кто ухитрился в самый момент катастрофы оказаться возле моста с киноаппаратом в руках? Скажем сразу: этим человеком был профессор университета штата Вашингтон Ф. Фаркарсон, и возле Такомского моста он оказался с киноаппаратом вовсе не случайно...

Пущенный в эксплуатацию 1 июля 1940 года Такомский подвесной мост, считавшийся третьим в мире по длине пролета, поразил американцев одним удивительным свойством: даже при умеренном ветре его дорожный настил начинал «галопировать» — подниматься и опускаться примерно на метр от положения равновесия. Слухи об этом быстро распространились по всей стране, и в штат Вашингтон потянулись на автомобилях любители острых ощущений, жаждавшие прокатиться в ветреную погоду по «галопирующему мосту». Администрация же штата, обеспокоенная столь необычным поведением сооружения, за которое было уплачено 6,4 млн. долларов, установила за ним наблюдение, так что 7 ноября 1940 года недостатка в свидетелях небывалой катастрофы не было...

В этот день над штатом разразился шторм и скорость ветра достигала 65 км/ч. Автомобилисты с восторгом носились на своих машинах по ритмически раскачивающемуся настилу. Но в 10 часов утра раскачивание вдруг прекратилось и перешло в жесточайшие крутильные колебания. Дорожный настил скручивался наподобие штопора с такой силой, что фонарные столбы занимали горизонтальное положение. Любителей острых ощущений сдуло как ветром: вместе с инженерами-наблюдателями они столпились на берегу, глаза на происходящее. Целый час страшные неведомые силы скручивали мостовой настил, и, наконец, конструкция не выдержала — центральный пролет со страшным грохотом рухнул вниз. Потеряв равновесие, опоры опрокинулись к берегу, и их удар по береговым участкам настила был столь силен, что профессора Фаркарсона сбросило на землю, и ему пришлось на четвереньках добираться до берега, сжимая в руке киноаппарат с драгоценными кадрами...

Что же произошло? Неужели такой опытный мостостроитель, как Л. А. Моисеев, спроектировавший Такомский мост, не произвел оценки ветровой нагрузки? Оцен-

ки, которую еще в 1880-х годах предпринял Б. Бейкер — строитель знаменитого Фортского моста в Англии. Исследовав действие ветра на поставленные перпендикулярно к нему пластины, Бейкер установил, что малые пластины оказывают ветру большее сопротивление на единицу площади, чем крупные. За прошедшие с тех пор пятьдесят лет аэродинамические исследования строительных конструкций широко вошли в практику проектирования и дали весьма необычные и интересные результаты.

Так, систематические испытания геометрических тел, стоящих на плоскости, — кубов, цилиндров, призм, пирамид, конусов — показали, что наибольший коэффициент сопротивления у квадратной призмы, стоящей поперек потока, — 1,5, а наименьший — 0,73 — у конуса. Это достаточно большие величины. Например, трехгранная пирамида «Трилон» высотой 205 м, сооруженная на одной из всемирных выставок, имела коэффициент сопротивления 0,88—1,43. При урагане со скоростью ветра 200 км/ч изгибающая сила составила 450 т.

Испытания модели знаменитого нью-йоркского небоскреба «Эмпайр Стейт Билдинг» показали, что коэффициент его сопротивления равен 1,5. Для сравнения укажем, что этот коэффициент для «летающей крепости» второй мировой войны составлял всего 0,033. Считая эффективную площадь поперечного сечения этого здания равной 9000 кв. м, нетрудно вычислить, что при урагане со скоростью ветра 160 км/ч сила, действующая на это сооружение, будет равна 2 тыс. т!

Особенно интересные результаты были получены при аэродинамических испытаниях всевозможных сооружений необычных форм для всемирных выставок. Так, на одной из них было решено построить гигантскую сферу. И вот какие неожиданные результаты были получены при продувках. Если коэффициент сопротивления изолированного шара составляет всего 0,19, то вблизи земной поверхности он уже имеет коэффициент сопротивления 0,3. Добавление опорных колонн повышает это значение до 0,49, а замена их одной цилиндрической опорой — до 0,58.

Но это еще не все: около земной поверхности шар испытывает не только сопротивление, но и подъемную силу! Да и немалую: в последнем варианте она почти равна силе сопротивления!

Конечно, Моисеев знал о важности учета ветровой нагрузки. Больше того, спроектированный им мост был рассчитан на то, чтобы выдерживать ветры ураганной силы. Но кто же мог предположить, что он развалится от крутильных колебаний балки жесткости, вызванных ветром весьма умеренной силы?

Исследование катастрофы показало, что мост был разрушен вихревой дорожкой фон Кармана — той самой, которая образуется в потоке за телами с тупыми кормовыми оконечностями. Балка жесткости Такомского моста оказалась самой невыгодной с точки зрения генерирования мощных воздушных вихрей, периодический отрыв которых от верхней и нижней ее кромки создавал значительные по величине вертикальные силы. Получилось так, что частота отрыва этих вихрей при умеренном ветре совпала с частотой собственных крутильных колебаний балки, и они непрерывно нарастали, пока конструкция не выдержала и не рухнула в воду..

Крушение Такомского моста вызвало переполох в США. Все крупнейшие висячие мосты страны были подвержены проверке, и выяснилось: почти все они в той или иной степени подвержены колебаниям под действием ветров постоянной скорости. Устранение этих колебаний потребовало создания новой инженерной дисциплины — аэродинамики мостов, которая предложила ряд рекомендаций для защиты от «галопирования»: для уже существующих мостов — подкрепление балок жесткости, а для вновь проектируемых — применение решетчатых балок вместо сплошных. Позднее, после обстоятельных продувок в аэродинамических трубах, было найдено более радикальное решение: поперечному сечению балки жесткости надо придавать профиль, близкий к аэродинамическому профилю крыла, который позволяет избежать возникновения вихрей. Придирчивая аэродинамическая отработка всех элементов конструкции привела к тому, что ветровая нагрузка на мост через реку Северн в Англии, построенный в 1960-х годах, оказалась в три раза меньше, чем на уже упоминавшийся нами Фортский мост.

Конечно, мосты не единственные конструкции, подверженные действию сил, возникающих при отрыве воздушных вихрей за плохо обтекаемыми телами. Эти силы раскачивают металлические дымовые трубы и мачты, заставляют «дышать» градирни и цилиндрические резер-

вуары, вызывают «галопирование» проводов на линиях электропередач. Вот почему в проектировании строительных конструкций в последнее время все чаще и чаще находит применение опыт авиаконструкторов и кораблестроителей. Так, установка геликоидальных насадок на стенках металлических труб и мачт, предотвращая образование крупных вихрей, прекращает их раскачивание. «Галопирование» проводов устраняют, наклеивая на их поверхность пластиковую ленту, которая придает проводу более обтекаемую форму и устраняет образование крупных вихрей. Колебания удается подавлять также с помощью всевозможных демпферов, ребер, обтекателей и т. д.

«Аэродинамическая поэма»

После создания теории гидроаэродинамического сопротивления стало ясно, какими необычными и нетривиальными процессами сопровождается полет в воздухе всевозможных шаров и мячей. О коварстве «резаных» мячей в теннисе и ударов «сухой лист» в футболе, где проявляется действие магнусовой поперечной силы говорили и писали немало. Но оказывается еще более сложно и необычно поведение мячей, применяемых в некоторых других играх.

Так, изготовители спортивного инвентаря опытным путем установили, что гольфовый мяч с неглубокими ямочками на поверхности летит при удачном ударе клюшкой на 200—230 м — в 6—7 раз дальше, чем точно такой же идеально гладкий мяч. После исследования Прандтля стало ясно, что ямочки — те же турбулизаторы, резко снижающие величину критической скорости для такого мяча. В результате он большую часть своего пути испытывает гораздо меньшее сопротивление, чем гладкий мяч, и летит значительно дальше. Иначе ведет себя гладкий мяч. Выброшенный со сверхкритической скоростью, он первые десять метров летит, как мяч с ямочками. Но вот скорость снизилась до критической, сопротивление резко возросло, мяч затормозился и упал на землю, не пролетев и 30—40 м. И выходит: шар с шероховатой поверхностью летит дальше и быстрее, чем идеально гладкий. Парадоксальный результат, который трудно было предвидеть заранее!

Но настоящей «аэродинамической поэмой» можно

было бы назвать необычное, часто непредсказуемое поведение в воздухе крикетного мяча. Крикет — разновидность лапты. Мяч для него весит 140 г и состоит из двух кожаных полусфер, туго набитых пробковой крошкой и сшитых посередине шестью рядами стежков. Общая ширина шва 20 мм, и это единственная неровность на гладкой блестящей поверхности мяча, наделенного поистине прихотливым нравом.

Иногда он ведет себя как положено: летит по строго баллистической траектории без всяких отклонений. Но иногда, посланный точно в руки игрока, он ни с того ни с сего берет правее или левее. А то и вовсе начинает куролесить: начав движение по баллистической траектории, он словно передумывает и на полпути либо резко замедляет движение, либо сворачивает в сторону. Правда, «с возрастом» характер крикетного мяча улучшается и он перестает своевольничать.

Исследования показали, что главный виновник всех этих странностей — шов. Если в момент удара он располагается точно поперек или вдоль направления полета, картина обтекания мяча строго симметрична и никаких отклонений не возникает. Но если шов расположен под углом к направлению полета, то при скорости меньше критической он оказывается отличным турбулизатором пограничного слоя. Турбулизированные швом части пограничного слоя загибаются за кормовую оконечность мяча, симметрия нарушается, и появляются отклоняющие силы.

Когда крикетному мячу сообщают сверхкритическую скорость, шов перестает играть роль турбулизатора, и мяч летит по баллистической траектории без отклонений. Но как только скорость снижается до критической, положение меняется. Если шов расположен поперек или вдоль направления полета, мяч резко тормозится, но летит в прежнем направлении. Если же шов находится под углом к потоку, мяч, затормозившись, еще и отклоняется в ту или иную сторону.

Мячи, много раз бывшие в игре, постепенно утрачивают гладкую поверхность. Она становится грубой, шероховатой, на ней появляются вмятины и бугры, швы сминаются, и постепенно крикетный мяч становится похож на гольфовый. И тогда его «молодое своеволие» пропадает: ориентировка шва перестает играть какую-либо роль, и только одно обстоятельство управляет те-

перь его движением — начальная скорость, которая может быть либо больше, либо меньше критической...

Данные, которых не доставало Ньютону

Мы уже упоминали о том, что первый научный эксперимент Ньютона был связан с аэродинамикой. Прыгая во время бури по направлению ветра и против него, 16-летний Исаак по разнице в дальности прыжка пытался определить силу, с которой ветер давит на тело...

Как мы знаем, эксперимент этот закончился неудачей, да и не мудрено: только в XX веке ученые получили данные, которые необходимы для такого расчета и которых не доставало Ньютону. С помощью этих данных попытаемся оценить те силы, которые действовали на Ньютона во время его первого научного эксперимента. Если считать, что дело происходило во время сильного шторма в 10 баллов, то скорость ветра по шкале Бофорта могла достигать 23 м/с. Выбрав высоту, на которую мог прыгнуть Исаак, равной 1,5 м, нетрудно вычислить максимальную скорость его прыжка — около 5 м/с. Таким образом, скорость обтекания тела воздушным потоком при полете против ветра составляла 28 м/с, а при полете по ветру — 18 м/с.

Для сложных контуров в аэродинамике применяют так называемую площадь сопротивления, равную произведению коэффициента сопротивления на площадь поперечного сечения и выражаемую в квадратных метрах. Эта величина для человека среднего веса и роста, находящегося в сидячем положении, близком к положению во время прыжка, составляет 0,56 м². Подставив эти цифры в формулу для силы аэродинамического сопротивления, получим, что при полете против ветра на Ньютона действовала сила примерно в 27 кг, а при прыжке по ветру — 11 кг. Разница, как видим, немалая...

Вычисление и оценка величины этих сил — не пустая игра ума, ибо именно эти силы управляют движением тела воздушного акробата в его свободном полете в воздухе. По-разному ориентируя свое тело в пространстве, он может в широких пределах регулировать скорость падения. Так, падая плашмя (руки по швам), акробат имеет площадь сопротивления около 0,84 м². Повернувшись на бок, он сокращает ее почти вдвое — до 0,66 м². Сжавшись в комок и обхватив колени руками, он снижа-

ет площадь сопротивления еще вдвое — до 0,186—0,28 м², а летя «солдати́ком» или «ласточкой», доводит сопротивление до минимума — до 0,111 м². Одежда, плотно прилегающая к телу, снижает площадь сопротивления на 5—10%.

По этим данным легко вычислить скорости, достигаемые акробатом в свободном падении: при полете плашмя — 38 м/с, на боку — 50 м/с, «в комке» — 66—80 м/с, «солдати́ком» или «ласточкой» — 105 м/с. Если создать уникальный аттракцион — парение в мощном восходящем воздушном потоке, то эти скорости будут «останавливающимися»: достигая их в соответствующем положении, спортсмен будет висеть в пространстве неподвижно. При беспорядочном падении в воздухе площадь сопротивления спортсмена составляет примерно 0,47 м². Для сравнения укажем, что у типичного истребителя второй мировой войны эта величина составляла около 0,56 м². Нетрудно оценить и действие парашюта. Зная, что коэффициент сопротивления купола, раскрытого навстречу потоку, равен 1,35, легко рассчитать: при диаметре 8—8,5 м² скорость падения парашютиста становится безопасной — 4 м/с.

Интересные результаты были получены при аэродинамическом исследовании движения мотоциклиста. Когда он сидит прямо, широко расправив плечи, его площадь сопротивления оказалась почти такой же, как у гораздо более крупного по размерам истребителя — 0,55 м². Стоило ему пригнуться низко к баку — и площадь сопротивления уменьшалась вдвое — до 0,29 м². А если в дополнение к этому на мотоцикл надеть обтекатель, то площадь сопротивления можно снизить еще в два раза — до 0,137 м². Именно так и был устроен мотоцикл, на котором некогда установили мировой рекорд скорости: при мощности 100 л. с. он развил скорость 290 км/ч...

Всего семьдесят лет назад некий инженер московского авиационного завода «Дукс» — крупнейшего в тогдашней России — убежденно заявлял: «Аэроплан не машина, его рассчитать нельзя». А современный инженер, как мы убедились, может рассчитать силы, действующие не только на самолет, но и на сотни других предметов и сооружений. Больше того, во всеоружии теоретических и экспериментальных знаний он легко оценит порядок сил, с которыми приходилось сталкиваться некоторым сказочным героям.

Например, нетрудно вычислить мощность гигантской головы, неприветливо встретившей пушкинского Руслана:

Помните:

И вдруг она, что было мочи,
Навстречу князю стала дуть;
Напрасно конь, зажмуря очи,
Склонив главу, натужа грудь,
Сквозь вихорь, дождь и сумрак ночи
Неверный продолжает путь...

В этих словах А. Пушкин описал ситуацию, когда сила аэродинамического сопротивления равна тяговому усилию коня. Примем его равным 500 кг. Чтобы дуновение головы остановило Руслана, сопротивление всадника и коня должно быть таким же. Принимая коэффициент сопротивления равным 1,3, площадь поперечного сечения всадника и коня $1,5 \text{ м}^2$, нетрудно вычислить «останавливающую скорость» — 65 м/с или 230 км/ч. Цифра достаточно большая, но не фантастическая: примерно такова скорость ветра в атлантических харрикейнах. В знаменитых же северо-американских торнадо скорость воздуха достигает 155 м/с.

Учитывая близость всадника к голове, можно оценить мощность остановившего его чудовища: она составляет около 2—2,5 тыс. л. с.

Как видим, ничего сверхъестественного. Разве можно сравнить эти цифры с тем, что уже освоено современной техникой? Здесь не в диковинку скорости, при которых нарушается сплошность воды и за движущимся в ней телом образуется каверна — полость, наполненная водяным паром. Здесь не в диковинку скорости, многократно превосходящие скорость звука, когда существенную роль в процессе начинает играть сжимаемость газа. Здесь не в диковинку скорости, при которых жидкости начинают вести себя как твердые тела, а твердые тела как жидкости... Но это уже другая тема...

СОДЕРЖАНИЕ

Введение. Что изобрел Роберт Фултон?	5
Глава I. Физика сквозь призму метафизики	9
Динамика, трактуемая философски	10
«О предмете древнейшем наука новейшая»	18
Иезуитские эксперименты иезуитов	23
Глава II. Искусство бросать ядра	27
«Летел навстречу славы, а встретился с ядром»	28
«Испытывая и снова испытывая»	34
Теоретики-гидродинамики и практики-гидравлики	39
Глава III. Объяснители ненаблюдаемого и наблюдатели не- объяснимого	47
XVII век и гидравлические школы Европы	47
Объяснители ненаблюдаемого	54
Наблюдатели необъяснимого	61
Запоздалые лавры англичан	75
Сопротивление, рожденное волной	84
Глава IV. Маленькие модели, без которых невозможны боль- шие корабли	91
Уроки Изамбара Брюнеля	93
Чародеи из Торкея	104
Глава V. Разрешение гидроаэродинамических парадоксов	115
Ньютоново заблуждение и его преодоление	115
Сила, рожденная циркуляцией	121
Русский аэродинамический триумф	132
Сопротивление, рожденное завихрениями	141
Разрешение парадоксов	150
Глава VI. «Эксплуатация победы»	159
Героическая эпоха авиации	161
Снова ветер	166
На стыке двух стихий	168
В поисках новых путей снижения сопротивлений	172
Забытый эффект аэродинамики	178
Как опасно возмущать потоки	182
«Аэродинамическая поэма»	186
Данные, которых не доставало Ньютону	188

Герман Владимирович СМЕРНОВ

РОЖДЕННЫЕ ВХРЕМ

Главный отраслевой редактор В. П. Демьянов

Редактор В. М. Климачева

Мл. редактор Н. П. Терехина

Худож. редактор М. А. Гусева

Художник В. И. Пантелеев

Техн. редактор Т. В. Луговская

Корректор Р. С. Колокольчикова

ИБ № 3025

Сдано в набор 07.09.81. Подписано к печати 12.05.82. А 02724. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 1. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10.08. Усл. кр.-отт. 10.5. Уч.-изд. л. 10.22. Тираж 70000 экз. Заказ № 8842. Цена 70 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 827713. Типография издательства «Коммунист», 410002, г. Саратов, ул. Волжская, 28.

Герман Владимирович Смирнов — инженер, журналист, популяризатор науки и техники. Работал в журналах „Техника — молодежи“ и „Огонек“, а также в агентстве печати „Новости“. С 1978 года — профессиональный литератор. За 20 лет работы в научной журналистике Герман Смирнов опубликовал около трехсот статей, посвященных главным образом судостроению и флоту, транспорту, военной технике, термодинамике и тепловым машинам, гидро- и аэромеханике, биографиям великих инженеров и изобретателей. Его перу принадлежат книги „Преемники Архимеда“, „Менделеев“, „Рассказы об оружии“, „Под знаком необратимости“. Кроме того, им написаны брошюры „Транспорт и время“ и „Цена скорости“ (в соавторстве с доктором технических наук Н. М. Синевым), „Кибернетика и химия“ (в соавторстве с П. Г. Кузнецовым), „Двигатель внешнего сгорания“, „Пассажирский пневмотранспорт“. Книги Германа Смирнова трижды награждались дипломами Всесоюзного общества „Знание“ на конкурсах на лучшие произведения научно-популярной литературы.

