

Автор предлагаемой читателям статьи Джеф Раскин — профессор Калифорнийского университета в Сан-Диего, один из разработчиков компьютера «Macintosh». Он не является ни профессиональным физиком, ни механиком. Тем не менее, статья показалась нам интересным примером того, как неутомимая любознательность и стремление разобраться в явлениях окружающего мира привели автора к необходимости критически изучить колоссальное количество литературных источников, поставить разнообразные простые и остроумные эксперименты и выработать, наконец, свое видение проблемы (хотя и не совсем полное и корректное).

Мы надеемся, что эта статья пробудит у читателей желание провести свои самостоятельные изыскания.

Для знакомства с более последовательными объяснениями физической сущности подъемной силы рекомендуем обратиться, например, к таким книгам: А.Л.Стасенко, «Физика полета» (Библиотечка «Квант», вып.70); С.Э.Хайкин, «Физические основы механики».

Статья перепечатывается (со значительными сокращениями) из журнала «Quantum» (сентябрь/октябрь 1994 г.).

Перевод с английского В.Мещерякова.

Окрыленный эффектом Коанда

ДЖ.РАСКИН

РАЗУМНОЕ объяснение явления «аэродинамической подъемной силы» было достигнуто в течение двух десятилетий после первого полета братьев Райт (под большим влиянием работы Людвиг Прандтля¹), но в элементарных учебниках и популярных статьях даже сегодня наиболее общее объяснение подъемной силы остается неясным. Приведем типичный пример этого.

Рисунок 1 основывается на материале введения в популярную книгу

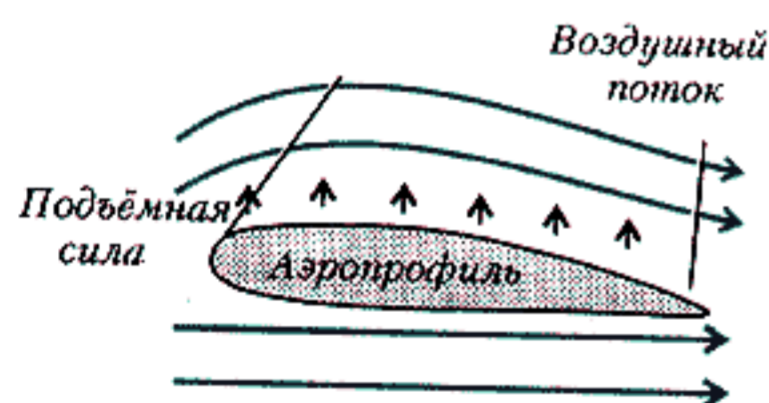


Рис. 1

Д.Макоулея «Особенности работы технических устройств»: «Поперечное сечение крыла имеет форму, называемую аэродинамическим профилем. При движении воздух обтекает крыло. Профиль крыла искривлен так, что

¹ Людвиг Прандтль (1875–1953) — немецкий физик, часто называемый «отцом аэродинамики». Его знаменитая книга по теории крыла была опубликована в 1918г. (Русский перевод под названием «Теория несущего крыла» появился в 1931 г. — Прим. ред.)

поток воздуха, обтекающий крыло сверху, движется быстрее, чем поток воздуха, обтекающий крыло снизу. Быстро движущийся воздух имеет более низкое давление, чем медленно движущийся. Поэтому давление воздуха под крылом более высокое, чем над ним. Эта разность давлений создает силу, которая вынуждает крыло подниматься вверх. Такую силу называют подъемной силой». Данное рассуждение безоговорочно обращается к эффекту Бернулли, который устанавливает, что чем быстрее воздух движется вдоль некоторой поверхности тела, тем ниже его давление на эту поверхность.

Сегодня, когда большинство самолетных крыльев имеет значительно большую кривизну профиля сверху, чем снизу, такому объяснению, казалось бы, можно поверить. Но еще в детстве я обнаружил, что оно сталкивает меня с загадкой: как же тогда самолет может летать верхом вниз (нечто подобное я видел на авиационных шоу)? Когда я пристал с этим вопросом к учителю, он сначала стал отвергать, что самолет может летать перевернутым, а потом попытался продолжить лекцию. Но, когда я, расстроенный, стал доказывать, что такое может быть, он закричал мне: «Заткнитесь, Раскин!». О том, что произошло после этого, я и собираюсь рассказать в этой статье.

Через несколько лет мне удалось уже самостоятельно выполнить некоторые расчеты на основе общепринятого объяснения работы крыла. Используя данные модели самолета, я нашел, что вычисленная подъемная сила составляет только 2% от силы, необходимой для полета модели. Полагая, что уравнение Бернулли является правильным (действительно, оно представляет одну из форм закона сохранения энергии), я столкнулся со второй загадкой: что является основным источником подъемной силы?

Рассмотрим в качестве примера летящий в воздухе вращающийся мяч. Пытаясь разобраться в том, почему искривляется полет мяча и как форма крыла влияет на подъем, мы увидим, как общепринятое объяснение может ввести в заблуждение даже известных ученых.

Вращающийся мяч. Траектория мяча, закрученного вокруг вертикальной оси и движущегося в воздухе, отклоняется вправо или влево от первоначально заданного направления. Опыт показывает, что этот эффект зависит, во-первых, от закрученности мяча и, во-вторых, от наличия среды (воздуха). Незакрученные мячи или закрученные в вакууме движутся по прямой. Но прежде чем продолжить, может вы сами захотите решить, в какую сторону будет отклоняться мяч, закрученный, напри-

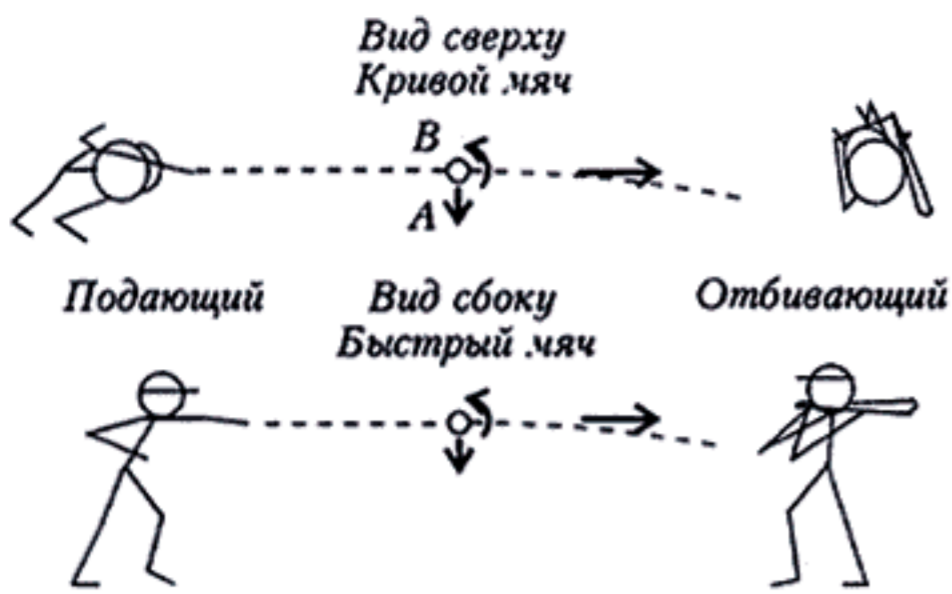


Рис. 2

мер, против часовой стрелки (если смотреть сверху).

Давайте посмотрим, что говорят об этой задаче книги: от тех, которые пишутся физиками и на которые все ссылаются как на авторитетные источники, до тех, которые подобны книге футбольного тренера моего сына, описывающей технику ударов по мячу. Начнем с физика Дж.Трефила, который в книге «Ученый на морском побережье» пишет: «Прежде чем закончить обсуждение эффекта Бернулли, я бы хотел указать на еще одну область, где его следствия должны быть обязательно изучены и которая несколько неожиданно проявляется в бейсболе. Рассмотрим, например, подачу «кривого мяча». Это особый тип подачи, при которой мяч бросают так, что при движении вперед он закручивается вокруг своей оси, как показано на рисунке 2, изображающем вид сверху. Из-за шероховатости поверхности мяча действие вязких сил приводит к возникновению тонкого слоя воздуха, вращающегося вместе с этой поверхностью. Рассматривая рисунок, можно понять, что воздух в точке, обозначенной буквой А, будет двигаться быстрее, чем воздух в точке В, потому что в первом случае скорость вращательного движения точек поверхности мяча складывается со скоростью мяча вдоль траектории, а во втором — вычитается. В результате этого возникает «подъемная сила», которая стремится переместить мяч в указанном на рисунке направлении».

Трефил затем показывает схему движения «быстрого мяча», отклоняющегося вниз, когда он закручивается так, что нижняя поверхность мяча вращается по направлению его движения. Это то же явление, что и в предыдущем случае, с тем лишь от-

личием, что ось вращения мяча повернута на 90 градусов.

В книге «Физика бейсбола» Р.Адзар рассматривает мяч, брошенный по направлению к месту игрока с битой так, что он вращается против часовой стрелки, как это показано на рисунке Трефила. Направление влево от подающего называется первой базой, вправо от подающего — третьей. Адзар пишет: «Мы можем тогда

полагать, что давление воздуха на третьебазовой стороне мяча, которая движется быстрее, будет больше, чем давление на первобазовой стороне, которая движется медленнее. Вследствие чего мяч будет отклоняться в сторону первой базы».

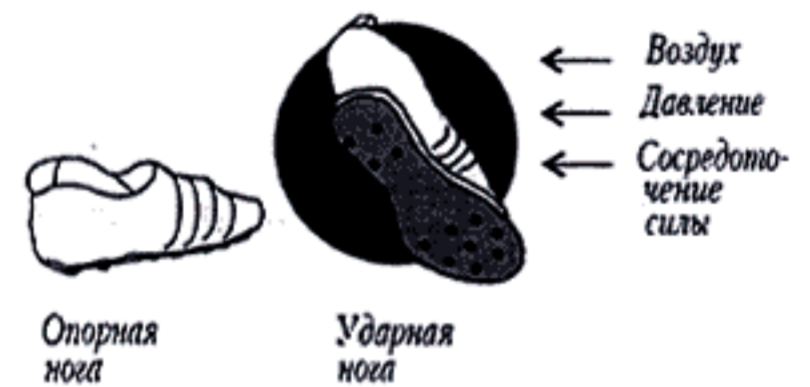
Выводы Адзара и Трефила прямо противоположны, хотя они согласны в том, что сторона мяча, вращающаяся по направлению его перемещения к принимающему игроку, движется быстрее, чем противоположная сторона. Тем не менее, мы усвоили из этих двух источников, что давление воздуха на одной из сторон мяча либо увеличивается, либо уменьшается в зависимости от скорости этой стороны. Но я не буду пока вставать на одну из сторон этого спора.

«Британская энциклопедия» вносит в дискуссию иные рассуждения, основывающиеся на введении концепции вязкого трения: «Трение стороны мяча, поворачивающейся в воздухе в направлении перемещения мяча, замедляет воздушный поток, в то время как на другой стороне трение ускоряет воздушный поток. Большее давление на стороне, где воздушный поток замедлен, толкает мяч в направлении области низкого давления на противоположной стороне мяча, где возникает относительное увеличение потока воздуха».

Ну вот, теперь уже мы выяснили, что вращающийся мяч заставляет воздух двигаться быстрее или медленнее по одну или другую сторону мяча. И еще — что быстро движущийся воздух увеличивает или уменьшает давление в зависимости от вашего выбора, какому авторитетному источнику следовать.

И вновь о книге тренера моего сына. Тренер — всего-навсего футболист международного класса

Дж.Лямпти. Он не дает теоретического обоснования, но мы можем быть достаточно уверены, что Лямпти неоднократно проводил опыт с мячом и должен поэтому правильно описывать направление поворота мяча. Он пишет: «Банановый удар является более или менее смещенным от центра мяча энергичным ударом подъемом ноги, который придает вращение футбольному мячу. Удар, смещенный от центра мяча вправо, искривляет траекторию мяча влево. Удар, смещенный от центра мяча влево, искривляет траекторию мяча вправо. В итоге



Мяч искривляет траекторию влево

Рис. 3

изгибы траектории футбольного мяча зависят от скорости вращения». Как вы можете видеть на рисунке 3, Лямпти, подобно Адзару, говорит о высоком давлении на стороне мяча, вращающейся по направлению его полета.

Я не буду касаться других мнений, которые принимают тот или иной способ поворота мяча. Некоторые объяснения зависят от авторской интерпретации эффекта Бернулли, некоторые связаны с вязкостью, некоторые — с трением, некоторые — с турбулентными явлениями в воздухе.

Позже мы вернемся к теме закручивания мячей, а сейчас продолжим обсуждение проблем с общепринятым мнением о подъемной силе.

Другие парадоксы. Традиционное объяснение работы крыла приводит нас к заключению, например, о том, что крыло, которое имеет слегка вогнутый низ (рис.4), будет всегда испытывать, при прочих равных условиях, меньшую подъемную силу по



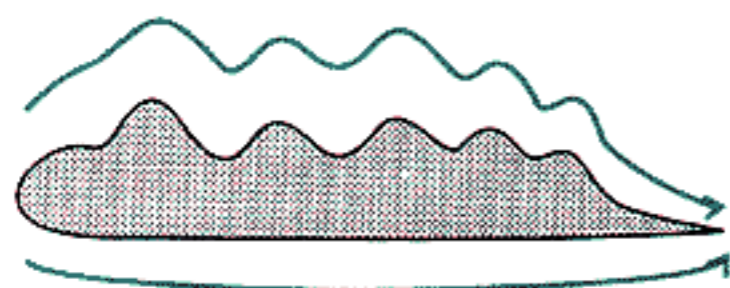
Крыло с вогнутым низом

Рис. 4

сравнению с плоскодонным крылом. Ведь у вогнутого снизу крыла путь воздуха вдоль нижней части профиля длиннее, чем у плоскодонного (на рисунке 1). Поэтому подъемная сила меньше. Правильно? Неправильно!

Кроме того, мы теперь вправе спросить: как тогда плоское крыло, подобное тому, которое имеет бумажный планер, без каких бы то ни было искривлений может обеспечить подъемную силу? Заметим, что плоское крыло расположено под углом к направлению движения планера. Этот наклон называется «углом атаки» и является необходимым для создания подъемной силы плоского крыла. Позже мы вернемся к этой теме.

Формы поперечных сечений авиационных крыльев называются «аэродинамическими профилями». Очень эффективным профилем крыла для небольших медленно летающих моделей является кусок какого-либо листового материала, изогнутый в виде арки. Однако из общепринятого объяснения вообще не ясно, как такое крыло, у которого верх и низ профиля имеют одинаковые длины, может создавать хоть какую-нибудь подъемную силу. Если бы общепринятый взгляд был корректным, мы должны были бы делать верх крыльев даже более криволинейным по сравнению с тем, как его делают сегодня. В этом случае воздух двигался бы еще быстрее, и мы получили бы еще большую подъемную силу. На рисунке 5 волнистость крыла сильно преувеличена (ниже мы встретимся с более реалистичными примерами).



Волнообразное крыло

Рис. 5

ми). Если мы сделаем верхнюю поверхность крыла подобно тому, как показано на рисунке 5, то воздух будет двигаться вдоль нее быстрее (так как воздух проходит больший путь), чем в случае крыла обычного типа. Возможно, вы придете к заключению, что такой вид профиля должен иметь избыток подъемной силы. В действительности же он может привести к катастрофе.

Достаточно примеров. Несмотря на

то, что уравнение Бернулли является правильным, его применение к решению вопросов об аэродинамической подъемной силе вносит значительную путаницу в выводы, основанные на использовании общепринятых представлений. Правильно примененное или нет, это уравнение предлагает не очень удобный образ того, что связывает форму профиля крыла с его подъемной силой, и ничего не говорит о силе вязкого трения. Эта трудность, объединенная с повсеместным существованием правдоподобно звучащего общепринятого мнения, вероятно объясняет, почему даже некоторые превосходные физики были введены в заблуждение.

Крыло Эйнштейна. Мой друг Йессо, который работает в авиационной промышленности, выступил с предложением улучшить профиль крыла. Рассуждая в рамках обычных представлений, он предложил добиться большей подъемной силы передел-



Глыбообразное крыло

Рис. 6

кой верхней части профиля способом, показанным на рисунке 6. Это глыбообразное крыло и есть как раз «разумная» версия волнистого профиля, который был рассмотрен ранее. Идея Йессо была, конечно, основана на концепции, что более длинная верхняя поверхность могла бы давать большую подъемную силу. Когда я был готов сказать Йессо, почему его замысел не будет работать, мне повезло поговорить с Е.Скофом, который разрабатывал авиационные проекты для фирмы «Сааб» в Швеции. Он рассказал мне о горбом профиле крыла (рис. 7), спроектированном Альбертом Эйнштейном во время Первой мировой войны. Обоснование такого профиля было тем же самым, что и рассуждения, которые использовал Йессо. Но это крыло не имело аэродинамичес-



Профиль крыла Альберта Эйнштейна

Рис. 7

ких преимуществ. Вместо того чтобы убежать Йессо в бесперспективности его затей, я сказал, что он придумал модернизированную версию эйнштейновской ошибки! (Эйнштейн впоследствии заметил с огорчением, что он оказался бестолковым.)²

Эксперименты. Если это аргумент, что профили крыльев создают подъемную силу исключительно потому, что поток воздуха у поверхности понижает давление на эту поверхность, то при искривлении поверхности не имеет значения, является ли она прямой, вогнутой или выпуклой. Общепринятое объяснение дает зависимость только от скорости потока, параллельного поверхности. Есть несколько опытов, которые вы можете легко воспроизвести для проверки этого утверждения.

Опыт 1. Возьмите полоску писчей бумаги размером приблизительно 5×25 см. Держите ее перед губами так, чтобы она высывалась из пальцев и обвисала, делая верхнюю поверхность выпуклой. Когда вы подуете поверх бумаги, она поднимется (рис. 8, а). Много книг приписывают этот эффект понижению воздушного

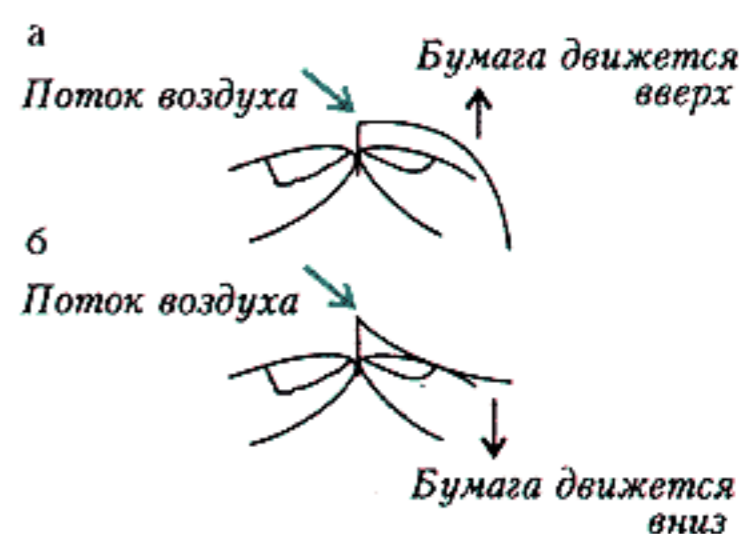


Рис. 8

давления наверху из-за эффекта Бернулли. Теперь с помощью пальцев

²Е.Скоф пишет: «В течение Первой мировой войны Альберт Эйнштейн временно работал в LVG (Luft-Verkehrsgesellschaft) в качестве консультанта. В LVG он спроектировал профиль крыла с резко выраженным горбом в середине хорды профиля — новшество, предназначенное увеличить подъемную силу. Крыло было протестировано в Гёттингенской аэродинамической трубе, а также на реальном самолете, и в обоих случаях было установлено, что оно не оправдывает возлагавшихся на него надежд. В 1954 г. Эйнштейн писал: «Хотя это, вероятно, правда, что первооснова полета может быть наиболее просто объяснена этим способом [по Бернулли], однако совсем не умно конструировать крыло в такой манере!».

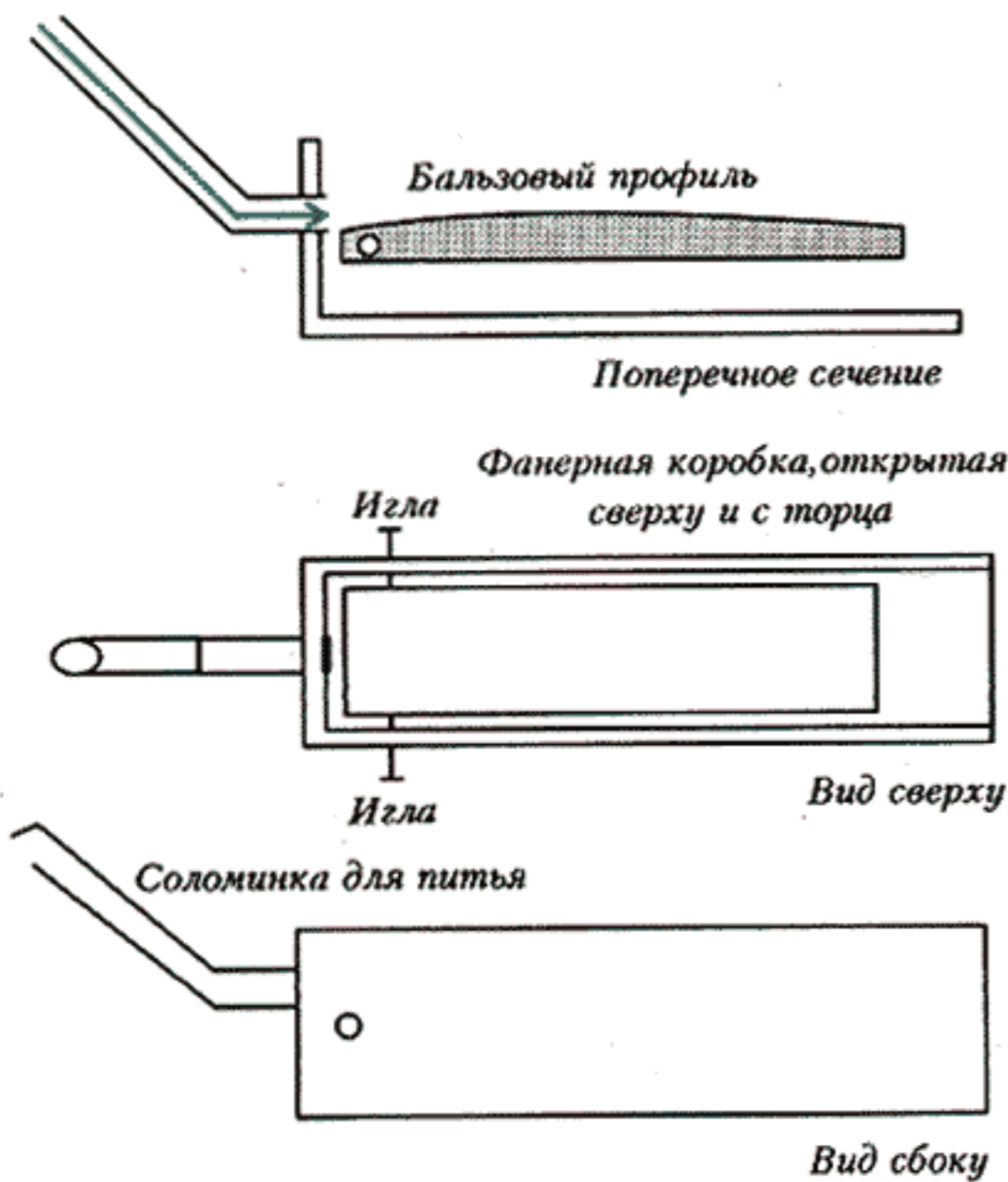


Рис. 9

придайте бумаге форму кривой так, чтобы ее верхняя поверхность стала слегка вогнутой вдоль всей длины, и вновь подуйте поверх полоски. Бумага теперь движется вниз (рис.8,б).

Опыт 2. Обращаясь к рисунку 9, сделайте коробку из тонкой фанеры или картона с помещенным внутри бальзовым крылом, удерживаемым парой игл, которые позволяют ему свободно откидываться вверх или вниз, а воздух вводится через соломинку для питья. Одна из приятных особенностей в науке та, что вы можете не принимать чье-либо слово за истину в последней инстанции. Вы можете проверить его сами!³ В этой аэродинамической трубе воздух протекает только поверх модели. Я сделал другую, в которой пылесос дует вдоль верхней и нижней поверхностей крыла, и получил те же результаты; но сооружение такой конструкции требует большего усилия, а модели крыла нуждаются в повышенном качестве передней и задней кромок. В связи с этим я пытался

³ В некоторых областях, например в изучении субатомных частиц, вам могут потребоваться миллионы долларов и штат из тысяч сотрудников для построения ускорителя, чтобы сделать независимую проверку, но указанная особенность тем не менее остается.

— спросил я. «Не знаю», — ответил главный конструктор. Эксперимент может быть трудным в интерпретации, но, если нет мошенничества, он не может давать неправильных результатов.

Когда воздух начинает продуваться через соломинку, крыло со стандартным профилем (рис.10) немедленно отрывается от дна коробки и поднимается. Когда продувка прекращается, крыло падает вниз. Это и есть то, что все ожидают. Теперь рассмотрим вогнутую форму. Форма кривой здесь та же самая, как у первого крыла, хотя обращена выпуклостью вниз. Если общепринятое объяснение было бы верным, тогда надо было бы ожидать, что это крыло тоже поднимется, так как длина кривой та же самая, как и в «стандартном» примере. В любом случае воздушный поток вдоль поверхности должен иметь пониженное давление, приводящее к появлению подъемной силы. Однако вогнутое крыло остается неподвижным внизу. Если вы поставите прибор вертикально, то увидите, что крыло будет двигаться прочь от воздушного потока.

Другими словами, часто цитируемый опыт, который обычно используется как демонстрация общепринятого объяснения подъемной



Рис. 10

убедить компанию, которая изготавливает научное демонстрационное оборудование, включить этот прибор в их предложения. Но они оказались не заинтересованными, потому что «он не дает правильных результатов». «Тогда как он работает?»

силы, не годится на роль демонстрации — какой-то другой эффект оказывается гораздо сильнее. Для остальных профилей (см. рис.10), ради забавы, попытайтесь предугадать направление движения каждого, прежде чем вы поставите их в прибор. Дж.Глейк как-то заметил, что «прогресс в науке происходит тогда, когда опыты противоречат теории». Хотя наука в нашем случае давно известна и опыт противоречит не аэродинамической теории, а часто преподаваемому общепринятому мнению, тем не менее, даже если наука не прогрессирует, прогрессировать может индивидуальное понимание.

Еще один простой опыт приведет нас к лучшему пониманию аэродинамических эффектов.

Эффект Коанда. Если струя воды течет вдоль поверхности твердого

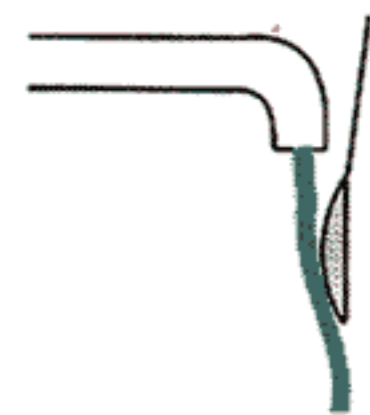


Рис. 11

тела, которая слегка искривлена в сторону струи, вода имеет тенденцию следовать этой поверхности. Это одно из проявлений эффекта Коанда⁴, которое легко демонстрируется,

⁴ В 1930-х годах аэродинамик из Рима Ненри Мари Коанда (1885—1972) наблюдал, что поток воздуха (или другого газа или жидкости), выходящий из сопла, имеет тенденцию следовать вдоль искривленной или плоской поверхности, если кривизна или угол, который поверхность образует с потоком, не являются слишком резкими.

например, с помощью ложки и тонкой струйки воды из водопроводного крана (рис. 11). Если держать ложку так, чтобы она могла качаться, и приблизить ее к струе, то можно почувствовать, как ложка дернется по направлению к потоку воды. Это — проявление третьего закона Ньютона: если ложка притягивает струю, то и струя должна притягивать ложку.

Эффект имеет границы. Если вы используете сферу вместо ложки, то обнаружите, что вода будет следовать только части пути. К тому же, если поверхность резко искривлена, вода не будет следовать ей, а будет только немного изгибаться и сразу же отрываться от поверхности.

Качественное представление подъемной силы. Описанные ранее эксперименты с миниатюрной аэродинамической трубой без труда объясняются с точки зрения эффекта Коанда: изогнутое вниз крыло (со стандартным профилем) увлекало воздушный поток вниз, следовательно, по третьему закону Ньютона, на крыло со стороны воздуха действовала сила противодействия, направленная вверх. Изогнутое вверх крыло (с вогнутым профилем) увлекало воздушный поток вверх, и результатом была сила, направленная вниз. Эффект Коанда помогает нам мысленно вообразить, почему угол атаки (крыла с равным наклоном во всю длину) является решающе важным; почему самолеты могут летать перевернутыми; почему «действуют» плоское и тонкое крылья; почему опыт 1 с выпуклой и вогнутой полосками бумаги показывает то, что можно было увидеть своими глазами.

Все, что было до сих пор представлено, никоим образом не является завершенным объяснением подъемной силы, а лишь указывает путь к установлению полезной картины явления. Воспользуемся этим путем для разумного рассмотрения проблемы вращающегося мяча.

Почему искривляется траектория вращающегося мяча. Посмотрим по-другому на рисунок 2. Эффект Коанда говорит нам, что воздух увлекается поверхностью мяча. Рассмотрим сторону А, которая вращается в направлении полета, причем сделаем это в системе отчета, в которой мяч неподвижен, а воздух движется и обтекает мяч. Сторона А стремится

увлечь воздух своим вращением. Это действие противопоставлено надвигающемуся воздуху. Поэтому увлечение воздуха вокруг мяча на этой стороне должно сначала замедлять надвигающийся воздух и затем ускорять его в противоположном направлении. На стороне В, которая вращается в направлении, противоположном полету, воздух уже движется (относительно мяча) в направлении надвигающегося воздуха и поэтому более легко увлекаем. Воздух с большей готовностью следует изгибу около В-стороны и приобретает скорость в направлении А-стороны. Поэтому мяч движется в направлении В-стороны противодействием со стороны воздуха.

Самое время вновь обратиться к простому опыту. Затруднительно экспериментировать с бейсбольными мячами, потому что их сила тяжести велика в сравнении с аэродинамическими силами, действующими на них, и очень трудно контролировать величину угловой скорости и направление вращения. Поэтому рассмотрим случай, где аэродинамические эффекты легче увидеть. Возьмем дешевый надувной пляжный мяч (дорогой мяч сделан из более тяжелого материала и хуже показывает аэродинамические эффекты). Брошенный с достаточным вращением (низ мяча движется вперед), такой мяч взмывает вверх по кривой по мере продвижения вперед. Подъемная сила благодаря вращению может быть настолько сильной, что оказывается больше, чем направленная вниз гравитационная сила! Вскоре сопротивление воздуха останавливает и вращение мяча, и его движение вперед, и он падает, но не раньше, чем продемонстрирует, что объяснение Трефила, как вращение влияет на полет мяча, является неправильным.

Появление подъемной силы, возникающей благодаря вращению тела во время движения в воздухе, обычно называют эффектом Магнуса⁵. Некоторые книги обсуждают «ротатор Флеттнера», который является давно заброшенной попыткой использовать эффект Магнуса для разработки эффективного корабельного паруса. (Флеттнер предлагал заменить парус

са на судах парой вращающихся вертикальных цилиндров, развивающих, при наличии ветра, боковую силу тяги.) Помимо Трефила, многие авторы получают эффект в обратном направлении, хотя работы университетского уровня обычно получают его правильно.

Это был шок осознать, что мой учитель и даже библиотечные книги могут быть неправы. И это было откровение, что я мог верить собственным размышлениям перед лицом такой «концентрированной» оппозиции. Игра с моделями самолетов позволила мне сделать огромный шаг в направлении к интеллектуальной независимости и духа новаторства, что позже в зрелом возрасте привело меня к созданию проекта компьютера «Macintosh» и другим изобретениям.

⁵ Г. Магнус (1802–1870) — немецкий физик и химик, демонстрировавший этот эффект в 1853 г.