

# ПОЧЕМУ ОНИ ЛЕТАЮТ?



**П**онимание того, как устроены и летают настоящие самолеты, помогает сконструировать хорошую модель из бумаги. У меня нет научной степени в области аэронавтики, но есть огромный интерес к этой теме. Так что я постараюсь объяснить вам основы этой непростой науки.

Бумажные самолеты называются **планерами**, потому что они планируют. Проще говоря, у них нет мотора. Так давайте же повнимательнее посмотрим на **силы**, заставляющие бумажные самолеты планировать.

## ОСНОВНЫЕ СИЛЫ

---

Начнем с простого. Основные силы, определяющие полет бумажного самолета — это подъемная сила, сила тяжести, сила сопротивления воздуха.

**Подъемная сила** — направленная вверх сила, возникающая при движении самолета в воздушной среде, **сила тяжести** — это сила, вызываемая гравитационным притяжением Земли, а **сила сопротивления воздуха** — это сила, препятствующая движению вперед. **Тяга** — сила, возникающая при работе двигателя самолета. Движение бумажного самолета обеспечивает лишь энергия вашего броска. Это чем-то напоминает первый резкий съезд на американских горках —

он должен обеспечить импульс, достаточный для того, чтобы вагончик мог катиться в течение всей поездки. Хорошие бумажные самолеты должны выдерживать короткий и быстрый бросок. После того как тяга перестает действовать, самолету, чтобы оставаться в воздухе, необходимо поддерживать баланс остающихся сил — сопротивления, подъемной силы и силы тяжести.

Рисунок 2 демонстрирует эти четыре основные силы в действии на примере настоящего самолета. Но они заставляют летать и бумажный самолет, и при его конструировании очень важно предусматривать необходимое соотношение этих сил — их баланс.

Теперь, когда мы поняли, какие четыре силы действуют на самолет, давайте посмотрим на его основное строение. На рисунке 1 показаны различные части самолета с двигателем.

Если мы начнем изменять расположение элементов самолета, то сможем легко предсказать результат. К примеру, если мы сместим крыло назад, оставив мотор на месте (как на рисунке 3), центр тяжести окажется перед центром давления. Самолет такой конструкции неминуемо потерпит аварию.

Однако если мы сместим мотор назад *вместе* с крылом (как на рисунке 4) и добавим впереди горизонтальный стабилизатор, то баланс будет восстановлен.

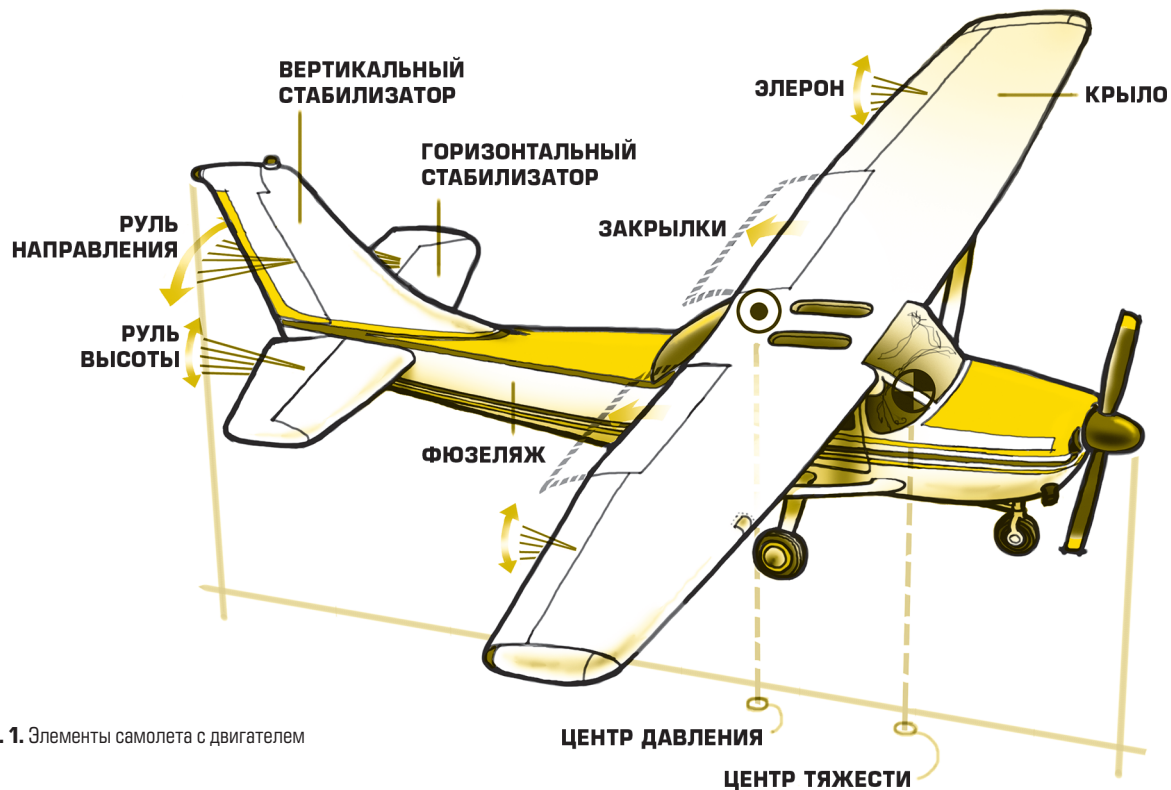


Рис. 1. Элементы самолета с двигателем

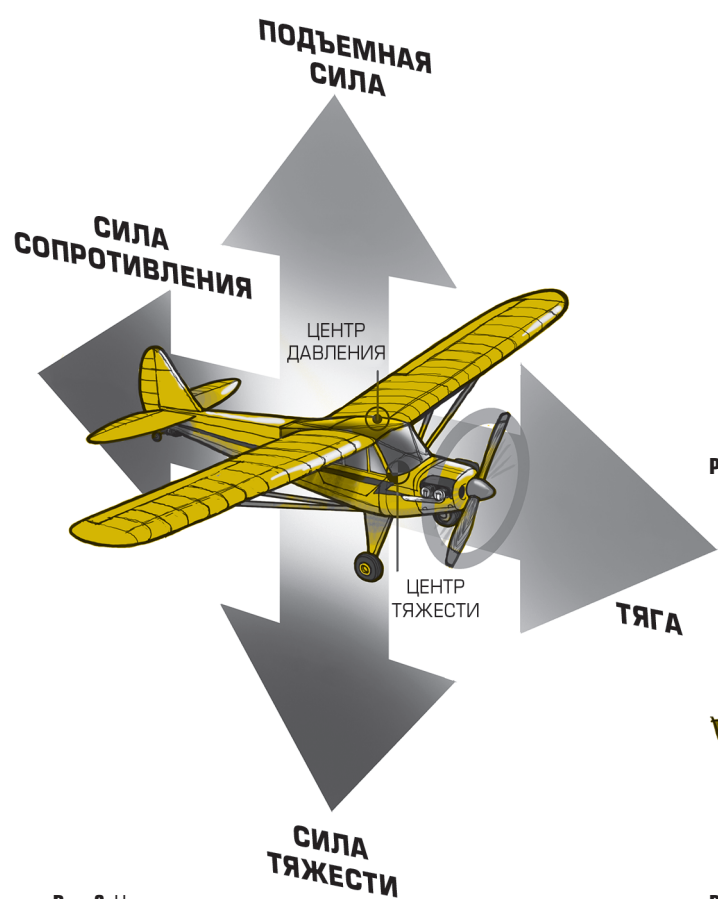


Рис. 2. Четыре силы



Рис. 3. Крыло располагается слишком близко к хвосту



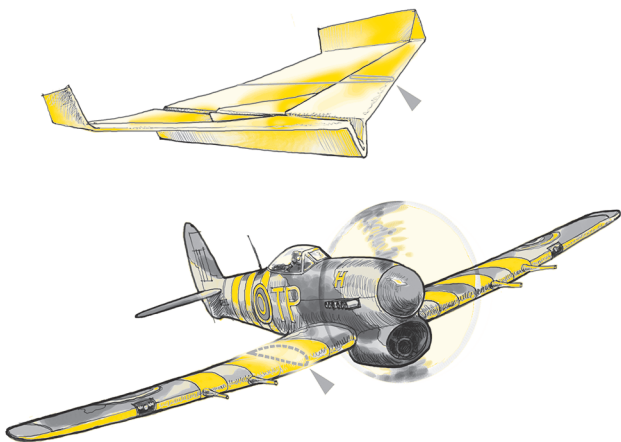
Рис. 4. И мотор, и крыло перемещены назад, что позволяет восстановить баланс

## ФОРМА КРЫЛА

Для бумажных самолетов действует правило: чем тоньше крыло, тем лучше. Плоские крылья имеют меньшее сопротивление, чем толстые или изогнутые. Когда речь идет о настоящих, больших самолетах, там все по-другому, но мы-то говорим о самолетах бумажных! Форма крыльев у бумажных самолетов чаще всего бывает либо прямоугольной, либо треугольной. Предыдущий рекордсмен по продолжительности полета (то есть времени пребывания самолета в воздухе) имел почти прямоугольную форму. У нынешнего рекордсмена в районе носа — форма треугольная, но его хвост прямоугольный.

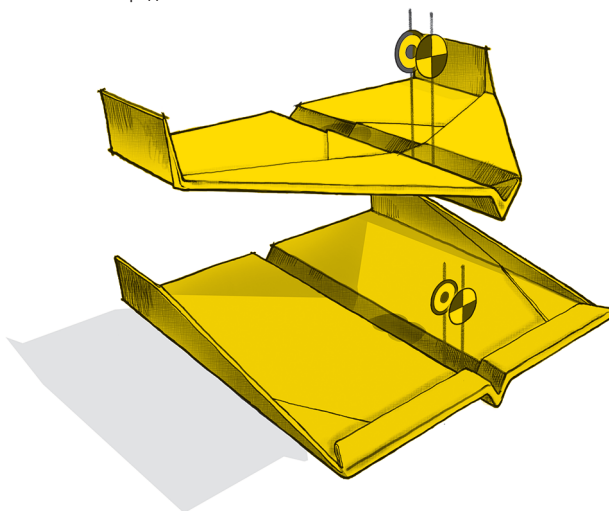
При проектировании бумажного самолета нужно обратить внимание на важную деталь — **относительное удлинение**, или, говоря проще, отношение длины крыла к его ширине. Идеальная форма для планера предполагает очень длинные и узкие крылья, похожие на крылья чайки или альбатроса. Такая конфигурация крыла имеет **большое относительное удлинение** — иными словами, расстояние от одной оконечности крыла до другой значительно выше, чем расстояние от передней кромки крыла до задней. Однако создание бумажного самолета с крылом, напоминающим крыло чайки, представляет непростую задачу для конструктора. Бумажные крылья должны выдержать мощный бросок, поэтому сконструировать крылья с высоким относительным удлинением для бумажного самолета очень трудно.

Давайте вернемся к нашему обсуждению основных форм крыла — треугольной и прямоугольной. Преимущество треугольной формы состоит в том, что слои бумаги можно перемещать к центру самолета, что повысит степень жесткости (в результате самолет станет крепче и выдержит более мощный бросок). Преимущество



**Рис. 5.** Крылья бумажного самолета должны быть очень тонкими. А крылья настоящего самолета могут быть достаточно толстыми

**Рис. 6.** Сравнение форм крыла: самолет, установивший последний мировой рекорд продолжительности полета, и его предшественник



**Рис. 7.** У верхнего самолета крылья с малым относительным удлинением. Крылья нижнего имеют большое относительное удлинение

прямоугольной формы — в большей эффективности планера: он сможет пролететь значительно дальше в расчете на каждый метр потери высоты.

Форма бумажного самолета определяет, где будет находиться его **центр давления**. **Центр тяжести** должен располагаться перед центром давления — это позволяет самолету двигаться вперед после броска (взгляните снова на рисунок 2, на котором видны расположение центра давления и центра тяжести).

У самолета прямоугольной формы почти половина веса бумаги должна приходиться на носовую часть, чтобы центр тяжести располагался перед центром давления. У самолета треугольной формы вес может быть расположен чуть дальше к хвосту, поскольку центр давления крыла расположен ближе к задней кромке крыла.

Подобные игры между формой крыла и центром тяжести превращают конструирование бумажных самолетов в бесконечное удовольствие. Главное — найти компромисс, который в данном случае выглядит следующим образом: чтобы по-настоящему эффективный планер летел

дальше, его не нужно бросать слишком высоко, поэтому можно отчасти пожертвовать жесткостью конструкции в пользу более широких крыльев (это позволяет планеру дольше оставаться в воздухе).

Самолет, предназначенный для преодоления больших дистанций, нужно бросать сильно, соответственно его конструкция потребует большего количества слоев в передней кромке крыльев и фюзеляжа. Для таких самолетов важна длительность полета по прямой, поэтому для них может оказаться предпочтительным более высокий хвост. Сколько же нужно слоев бумаги? Насколько широкими можно сделать крылья? Насколько высоким должен быть хвост? С какой силой бросать самолет? Ответы на эти вопросы позволяют вам использовать различные стратегии. Мой самолет, установивший мировой рекорд, был результатом целого ряда компромиссов. Но помните: безусловно, возможны и другие решения, более того — они могут оказаться куда более удачными.

## УГОЛ ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА ПЛОСКОСТИ КРЫЛА

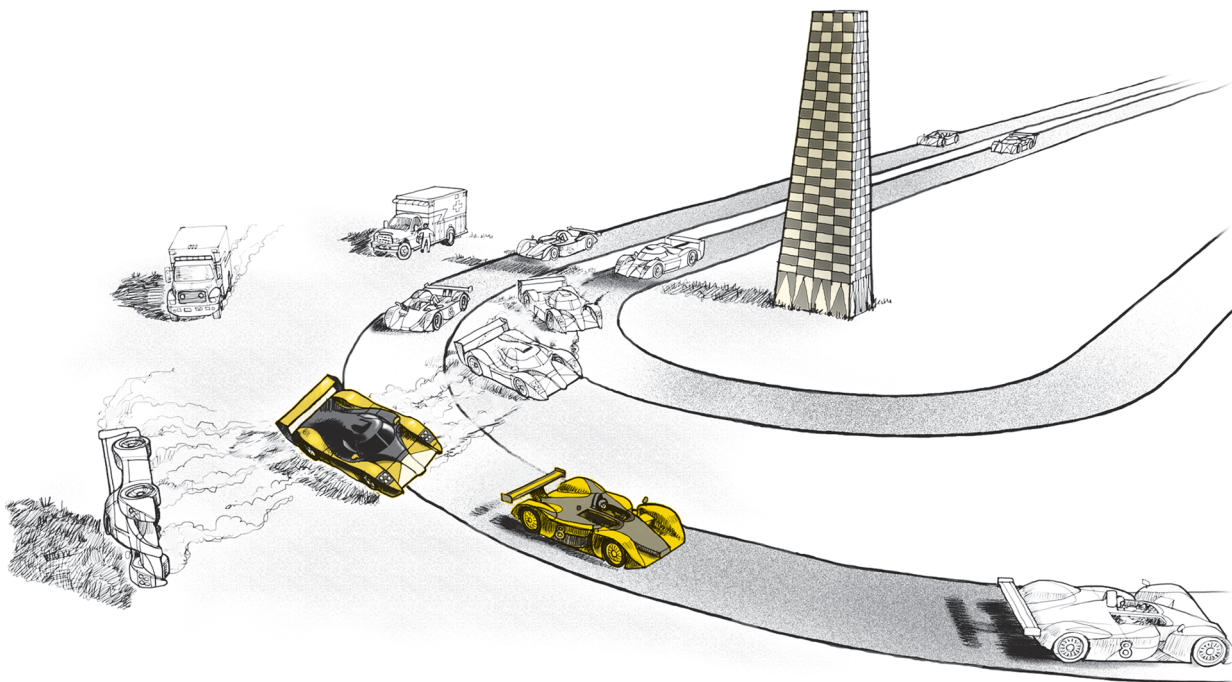
Еще один основной компонент стабильности при полете называется **углом поперечного изгиба плоскости крыла** — в конструкции самолета это угол, под которым крылья прикрепляются к фюзеляжу самолета. Посмотрите на рисунок 8.



**Рис. 8.** Положительный и отрицательный углы поперечного изгиба плоскости крыла

Если крылья расположены выше горизонтали, значит, они имеют **положительный угол поперечного изгиба плоскости крыла**. Если же крылья находятся ниже горизонтали, у них будет **отрицательный угол поперечного изгиба плоскости крыла**.

Положительный угол помогает поместить центр давления выше центра тяжести, тем самым создавая условия устойчивого полета. К примеру, если самолет колеблется в одну сторону, то его центр тяжести будет стремиться обратно к вертикали. За наличие этого свойства у самолета с положительными углами поперечного изгиба плоскости крыла приходится расплачиваться повышением силы сопротивления и снижением подъемной силы. Полет представляет собой набор компромиссов между различными силами.



**Рис. 9.** Влияние масштаба: молекулы воздуха можно представить в виде несущихся по трассе гоночных автомобилей. Если автомобиль попытается войти в поворот на слишком большой скорости, то его колеса утратят сцепление с дорогой и машина не сможет удержаться на трассе



## ВЛИЯНИЕ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА

Идя к рекорду, я изучал изменения в обтекании воздушным потоком моего самолета при различных скоростях. Конечно же, мои показатели никак не сработали бы для большого самолета вроде «Боинга-747»: воздушные потоки по-разному обтекают бумажный самолет и полноразмерный пассажирский лайнер.

Изменения в поведении воздушного потока на крыле бумажного самолета являются производными **влияния масштабного фактора**. Масштабирование влияет на объект следующим образом: молекулы воздуха не меняют размера или формы. Они остаются одними и теми же, независимо от размера крыла. Поэтому если вы уменьшите масштаб изящно изогнутого крыла «Боинга-747» до размеров бумажного самолета, молекулы воздуха должны будут резко изменить направление движения на весьма коротком расстоянии — так же, как машины на рисунке 9.

Позвольте теперь перейти к одному важному понятию: существуют пределы того, насколько быстро может изменяться направление движения воздуха вокруг быстро движущегося объекта (будь то «Боинг-747» или бумажный самолет). В количественном виде это зависит от так называемого числа Рейнольдса, оценивающего соотношение между силами инерции и вязкости в жидкостях или воздухе. Число Рейнольдса позволяет специалистам по аэродинамике использовать в экспериментах масштабные модели в половину и даже четверть от обычного размера. Иными словами, им не нужно строить огромный ангар для тестирования полноразмерных моделей «Боинга-747».

Какой из этого следует вывод? Лучше, если крылья бумажного самолета будут плоскими, а не изогнутыми, что позволит улучшить обтекание крыла воздухом. При изменении скорости обтекания небольшие крылья бумажного самолета могут сталкиваться со значительными изменениями направления движения воздушного потока в передней и задней части. На полноразмерном крыле самолета такие же изменения будут оказывать гораздо меньшее влияние.

## СВАЛИВАНИЕ

Что такое **сваливание**? Это потеря подъемной силы, вызванная ситуацией, при которой воздушный поток в районе крыла начинает вести себя хаотично. Такое происходит, когда самолет движется на слишком низкой скорости либо его

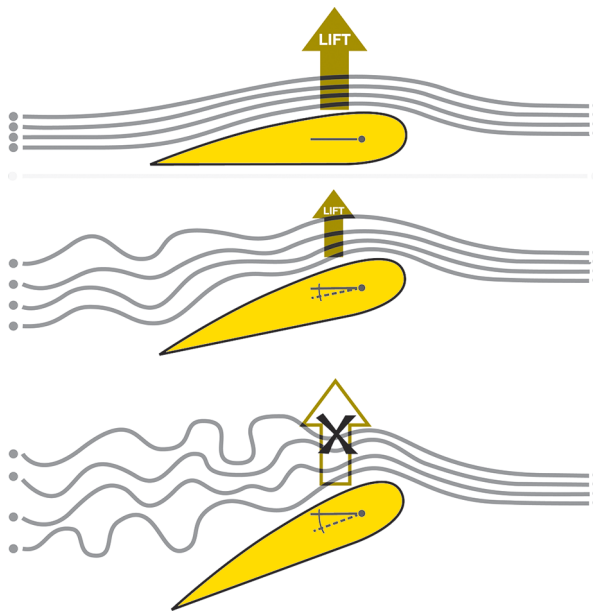


Рис. 10. Сваливание возникает, когда угол атаки оказывается слишком большим

крылья имеют слишком большой угол относительно потока воздуха (эта ситуация известна как большой **угол атаки**) или при сочетании этих двух факторов. Сваливание возникает, когда воздух больше не может следовать форме крыла для создания подъемной силы (на рисунке 10 мы видим, что происходит с обтеканием воздушным потоком по мере увеличения угла атаки — со временем мы полностью потеряем подъемную силу).

## КАЧЕСТВО ПЛАНИРОВАНИЯ

Качество планирования представляет собой показатель, описывающий, насколько далеко вперед может улететь самолет при потере стандартной единицы высоты. Обычно этот показатель выражается в виде соотношения — например, 4:1 или 50:1. То есть, самолет может пролететь 1,2 м перед тем, как потерять 30 см высоты, а может пролететь 15 метров, перед тем как потерять первые 30 см высоты. Понятно, что качество планирования при соотношении 50:1 значительно лучше, чем при 4:1.

## ВЕРТИКАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ СНИЖЕНИЯ

На соревнованиях не менее важен и другой показатель — **вертикальная скорость снижения**. Он говорит о том, как сильно уменьшается высота полета за стандартный интервал времени. Легкие

самолеты с низким качеством планирования могут иметь довольно низкую вертикальную скорость снижения — иными словами, они могут оставаться в воздухе дольше, чем более тяжелые самолеты с более высоким качеством планирования. К примеру, если самолет имеет качество планирования 1:1, однако снижается всего на 30 сантиметров в секунду, он может остаться в воздухе дольше, чем самолет с качеством планирования 5:1, теряющий по 60 см высоты в секунду. Главный показатель продолжительности полета — это время до того момента, когда самолет коснется земли. Хорошее качество планирования может быть полезным, и при прочих равных условиях самолет с самой низкой вертикальной скоростью снижения выиграет состязание (в случае, если запуск самолетов производится с одной и той же высоты).

## УПРАВЛЯЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ

Баланс между четырьмя силами, о которых мы говорили в начале главы, — это первый шаг к созданию хорошей летающей машины. Второй шаг — корректирующие маневры или действия, приводящие к определенному поведению самолета. Именно здесь вступают в игру **управляющие поверхности**. Термин *управляющая поверхность* описывает движущуюся часть любой внешней поверхности летательного аппарата. Для самолета — это руль направления, руль высоты и элероны. Рули высоты контролируют движение самолета вверх и вниз, рули направления — движение вправо и влево, а элероны контролируют крен. Обо всех этих управляющих поверхностях мы поговорим детально чуть ниже.

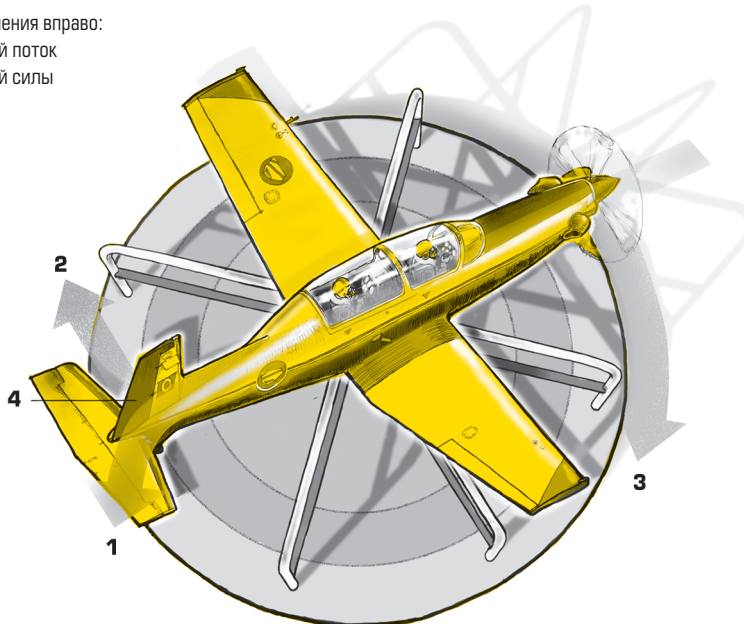
Попробуйте высунуть руку из окна движущегося автомобиля (не для удовольствия, а лишь во имя научного любопытства). Не вытягивайте руку дальше зеркала заднего вида. Держите руку горизонтально (то есть распрямите ладонь и направьте ее параллельно земле) так, чтобы большой палец указывал на направление движения автомобиля. Небольшое движение — и рука может повернуться вверх, вниз, влево или вправо. Например, вы повернули руку так, что ладонь смотрит в сторону движения. И тогда сила сопротивления воздуха оттягивает руку в противоположном направлении. Если вы повернете запястье так, чтобы большой палец указывал вниз, воздух начнет бить в тыльную сторону ладони и стремиться вверх, при этом толкая руку вниз. Управляющие поверхности самолета работают по такому же принципу. Воздух противодействует им, заставляя самолет поворачивать влево, вправо, уходить вверх, вниз или же в крен.

Закрылки и элероны у большинства обычных самолетов находятся в задней части основного крыла. Однако для бумажных самолетов руль высоты и руль направления представляют собой самые важные управляющие поверхности. С технической точки зрения, у большинства бумажных самолетов используется так называемое **сопрягающееся крыло**. Это означает, что основное крыло плавно переходит в хвост. На таких крыльях некоторые функции управления совмещаются. К примеру, руль высоты работает как элерон и поэтому называется **элевон**.

Много новой информации? Не переживайте. У бумажного самолета куда меньше движущихся частей и, соответственно, меньше элементов их контроля. А это помогает нам научиться тому, как работают управляющие поверхности.

**Рис. 11.** Поворот руля направления вправо:

- 1 — руль отражает воздушный поток
- 2 — действие противостоящей силы
- 3 — поворот всего самолета
- 4 — руль направления



## РУЛИ НАПРАВЛЕНИЯ

Давайте посмотрим на поворот руля направления. Пилот пользуется рычагами управления, переводя руль в положение, при котором он начинает отражать воздух. На рисунке 11 руль направления был повернут в правую сторону. Воздух, ударяющийся об этот руль, будет отклоняться вправо и толкать хвост в левом направлении.

Это очень важно отметить — самолет в полете будет вращаться вокруг центра давления. Если хвост движется влево, то нос самолета будет двигаться вправо. Чем-то это напоминает доску-качели с центром давления в середине. Движение руля направления толкает нос влево, и воздух отражается влево, толкая хвост вправо.

## РУЛИ ВЫСОТЫ

Руль высоты работает по такому же принципу. Однако он контролирует движение самолета вверх и вниз (в отличие от руля направления, контролирующего движение вправо и влево).

Вы управляете самолетом, контролируя рули направления и высоты. Чтобы бумажный самолет делал то, что вы от него хотите, большего и не требуется. Управление полноразмерным самолетом требует куда большего.

Посмотрите на рисунок 12. Если пилот поднимает руль высоты, то воздух будет ударяться о него и отталкиваться вверх, заставляя хвост опускаться вниз, а нос, соответственно, подниматься вверх.

### ЦЕНТР ДАВЛЕНИЯ

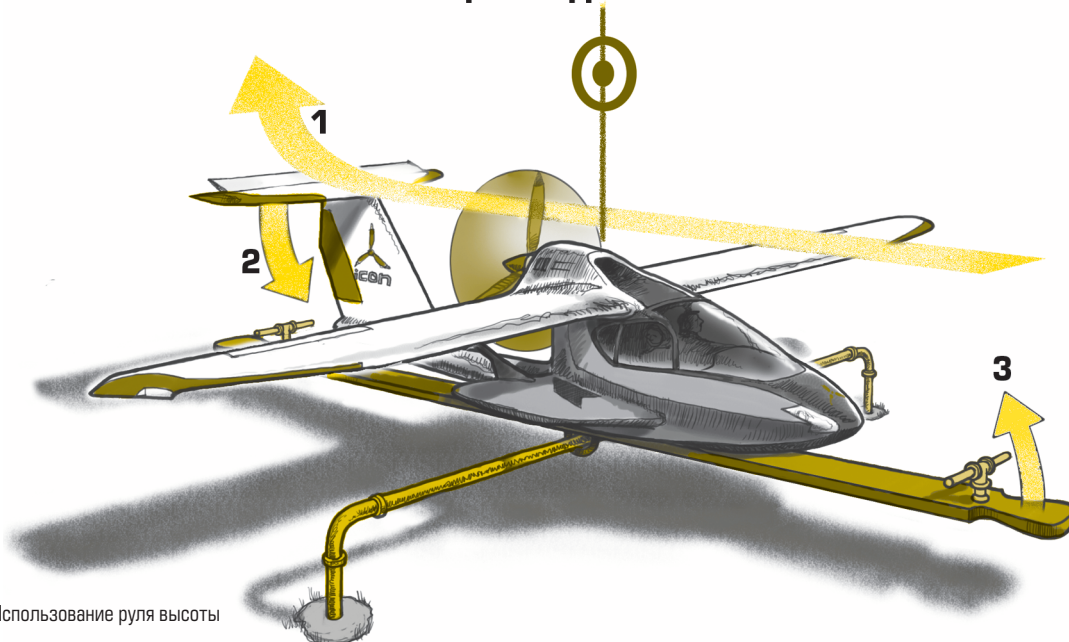


Рис. 12. Использование руля высоты

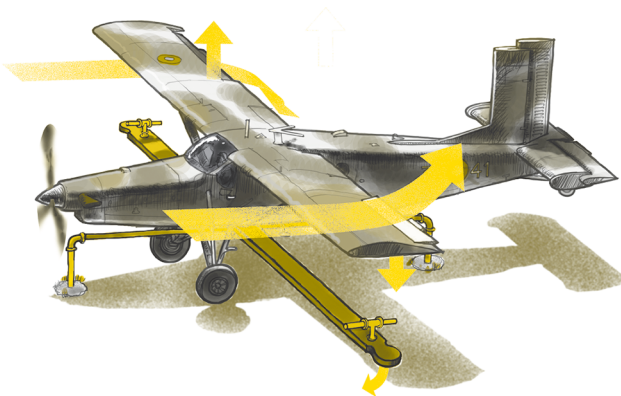


Рис. 13. Использование элеронов для ввода самолета в крен



Рис. 14. Использование закрылков для увеличения несущей поверхности

## ЭЛЕРОНЫ

---

Повороты руля направления приводят к довольно медленным поворотам самого самолета. Он скользит в сторону по широкой траектории. Полноразмерные самолеты и хорошие модели самолетов с дистанционным управлением используют другой трюк, чем-то похожий на то, как вы наклоняете велосипед, чтобы быстрее повернуть. Это умеют и самолеты, и такое действие носит название **крен**. Уровень крена контролируется элеронами, показанными на рисунке 13. Элероны напоминают рули высоты, однако крепятся к основному крылу. На полноразмерных самолетах элероны представляют собой управляющие поверхности, более всего удаленные от фюзеляжа.

Представьте себе, что воздух отражается вниз лишь от правого крыла. Из-за этого оно начинает двигаться вверх, при этом «качели» центра давления продолжают работать. Если левое крыло опускается вниз, а правое крыло поднимается, то самолет клонится влево. Если мы в этот момент задействуем руль высоты, то самолет будет кругами «взбираться» влево.

Летая обычными пассажирскими самолетами, вы наверняка чувствовали, как они совершают такой поворот с креном при взлете или посадке. Обычное движение руля не обеспечивает того же уровня точности и управляемости, это возможно только при применении элеронов. Обратите внимание на то, как совершают повороты парящие птицы вроде ястребов или чаек. Часть перьев на их крыльях похожа на элероны, с их помощью они управляют своим полетом и совершают элегантные повороты с креном.

## ЗАКРЫЛКИ

---

Помимо элеронов полноразмерный самолет также имеет **закрылки**, показанные на рисунке 14. Они выполняют очень простую функцию, позволяя увеличить площадь крыла при полетах на сравнительно низких скоростях. Закрылки используются во время взлета и посадки для того, чтобы сделать крыло больше, то есть увеличить его **несущую поверхность**. Конструкторы самолетов делают крылья достаточно большими для того, чтобы поднять самолет и груз на крейсерской скорости. Однако это приводит к повышению сопротивления воздуха (а значит, и к повышению затрат топлива). Поэтому и возник вопрос, как сделать взлет и посадку более эффективными. Крыло большего размера позволяет самолету подняться в воздух при более низкой скорости. Представьте себе, насколько больше должны были быть аэропорты, если бы огромные самолеты

не использовали закрылки. Для начала пришлось бы значительно увеличить длину взлетно-посадочных полос. Чтобы взлететь, большому самолету пришлось бы набрать скорость порядка 500 км/ч!

Закрылки легко решают эти проблемы, увеличивая крыло во время движения на небольшой скорости. Как только самолет набирает крейсерскую скорость, они легко убираются. Закрылки — это управляющие поверхности, расположенные ближе всего к фюзеляжу. Мне еще предстоит придумать бумажный самолет, у которого есть закрылки. Возможно, это удастся и вам, раз уж вы теперь знаете, что они из себя представляют. Было бы здорово придумать что-нибудь, позволяющее бумажному самолету каким-то образом увеличивать площадь крыла во время полета.

## А ТЕПЕРЬ НЕМНОГО СТРАННОСТЕЙ...

---

Обычно все без особого труда разбираются с диаграммой основных сил, с которой мы начали эту главу. Проблемы обычно появляются на попытках понять, а почему, собственно, самолет поднимается в воздух. Мне особенно нравится именно эта часть полета. Здесь настоящий простор для творчества и фантазии, потому что поведение самолетов при взлете хоть и следует научным доводам, однако я все же не стал бы слепо им верить...

Наша способность понять тайну полета ограничивается наблюдением за природой воздуха и гравитации. Мы можем видеть, как она проявляется, но сама суть остается для нас невидимой.

Чтобы вас развлечь, я решил описать пару теорий, связанных с возникновением подъемной силы — одного из основных понятий теории полета. Итак, взгляните на школьную доску!

## БЕРНУЛЛИ

---

Большинство учителей физики, объясняя теорию полета, начнут свой рассказ с Даниила Бернулли, швейцарского математика и признанного теоретика своего времени (1700–1782), впервые описавшего гармонические колебания, кинетические представления о газах и, разумеется, гидродинамику. Мне очень нравится история о том, как некие монахи наняли Бернулли для того, чтобы он придумал, как добывать из глубины воду. Для выполнения этой задачи было необходимо понимать существование и важность разницы давлений внутри труб.

Работа Бернулли с жидкостями была со временем принята на вооружение и для расчетов,



связанных с воздушными потоками. Основные его труды были написаны примерно за 150 лет до полета братьев Райт. И еще больше времени потребовалось ученым для того, чтобы соединить выводы Бернулли и данные, полученные в ходе полетов, поскольку они были разделены временем, расстоянием и областями применения.

Крыло с большим изгибом в верхней части заставит ту массу потока воздуха, которая находится сверху, следуя за изгибом, двигаться быстрее. Из работ Бернулли мы знаем, что в жидкости, которая движется быстрее в замкнутой среде, снижается давление. Соответственно, давление на верхнюю часть крыла будет ниже. Каким термином мы обычно называем силу, возникающую вследствие этого пониженного давления? Правильно, «подъемная сила». Причинно-следственные связи в данном случае обычно формулируются так: более быстрое движение потока (воздуха) приводит к возникновению низкого давления. Если вы пока что не до конца понимаете, как это работает, посмотрите на рисунок 15.

Затем некий преподаватель начинает углубляться в высшую математику, решая дифференциальные уравнения, чтобы рассчитать параметры потока, плоскости крыла и скорости. Все эти переменные включены в уравнение Бернулли.

Но давайте еще раз подумаем. Бернулли работал с закрытой системой — водой в трубах. Лично мне небо совсем не кажется замкнутой системой. Некоторые утверждают, что статическое

давление атмосферы как раз и создает замкнутую систему. Возможно, но тогда этим людям придется ответить на мой вопрос: «А что же тогда представляет собой открытая система?»

Кроме того, в примере с потоком предполагается, что поток на верхней части крыла доходит до его задней кромки в тот же момент, что и поток в нижней части крыла. Эта теория имеет название **теории равного переноса**. Но на практике это не совсем так.

Если вы раскрасите воздушные потоки, обтекающие крыло сверху и снизу, в разные цвета, то увидите, что воздух сверху значительно быстрее доходит до задней кромки крыла. Поэтому описанное выше явление не полностью объясняет механизм возникновения подъемной силы. Должен при этом отметить, что найти уязвимое место в чужой теории всегда проще, чем создать свою, по-настоящему хорошую.

## «СГУЩЕНИЕ» ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ?

Некоторые специалисты по аэродинамике являются сторонниками другой теории, которая нравится мне чуть больше. Идея состоит в том, что воздух как бы «сгущается» при соприкосновении с передней кромкой крыла. Это кажется мне разумным. Потому что возникает трение.

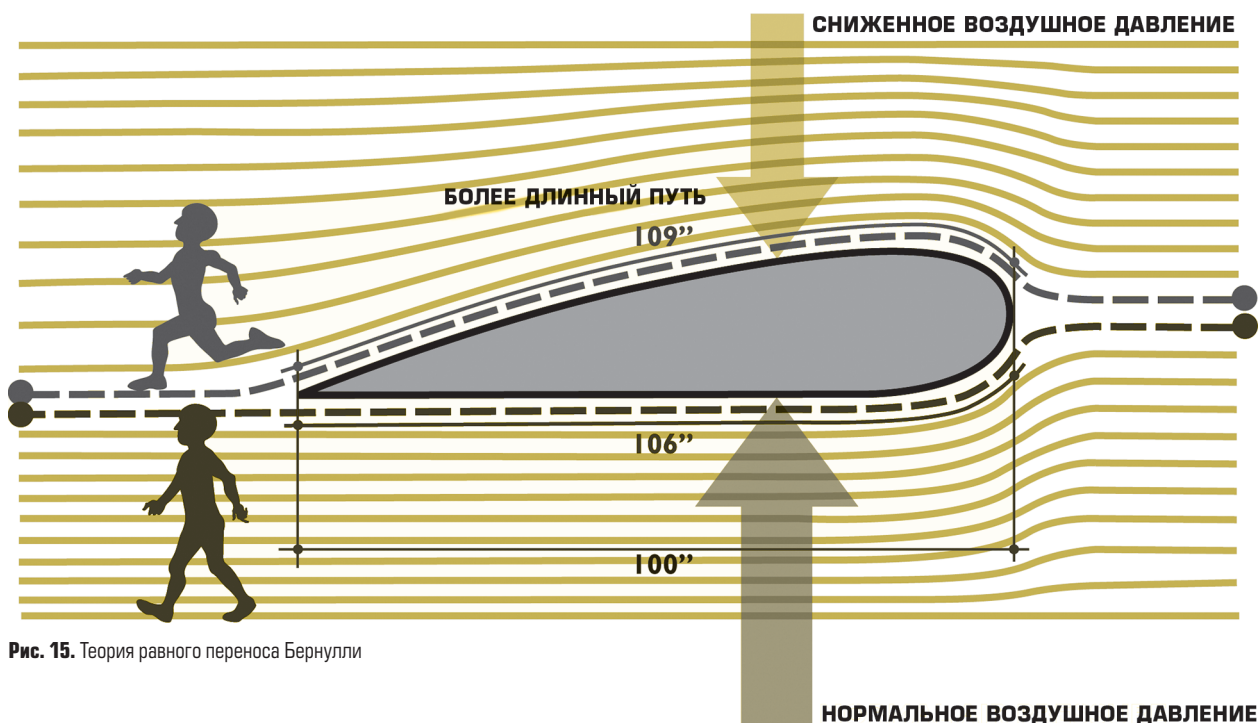
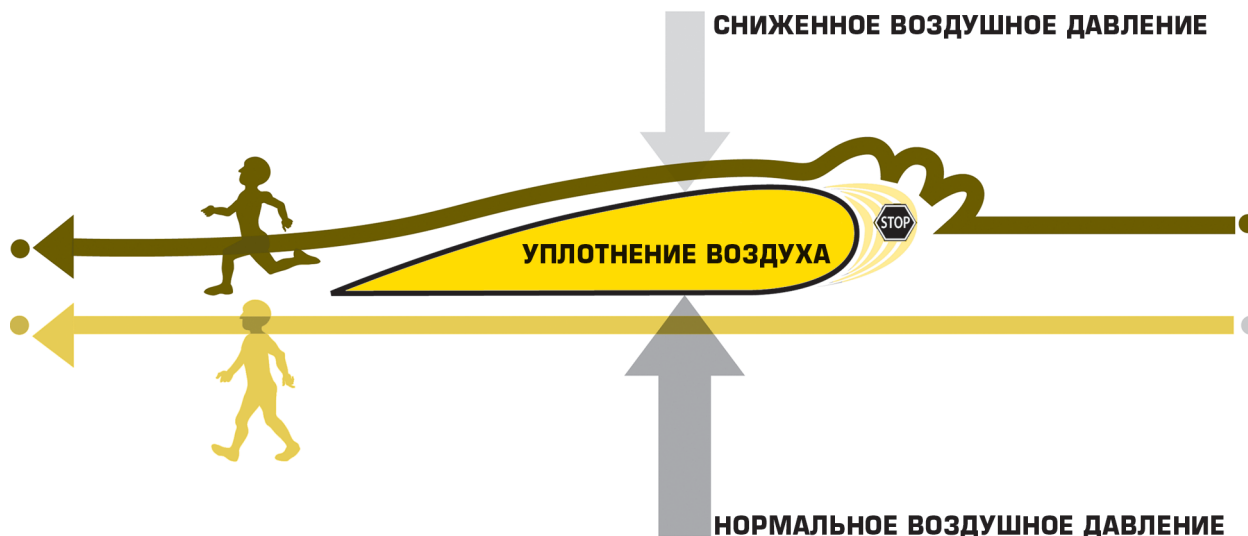


Рис. 15. Теория равного переноса Бернулли



Движение воздуха замедляется из-за соприкосновения с поверхностью крыла. А если вспомнить еще и об изгибе верхней его части, то получается, что воздух в верхней части крыла уплотняется еще сильнее. Действие этого эффекта проиллюстрировано на рисунке 16.

Уплотнение воздуха приводит к разнице давлений по всему крылу. Вследствие уплотнения воздуха давление повышается, а чуть дальше по крылу — снижается. Соответственно, воздух начинает ускоряться при движении в сторону зоны с более низким давлением и «смывается» с задней кромки крыла быстрее, чем воздух, находящийся под крылом. Подобная причинно-следственная связь обычно формулируется следующим образом: более низкое давление ускоряет движение потока воздуха.

Теперь дело приобретает интересный оборот. Итак, у нас есть два правдоподобных, однако полностью противоречащих друг другу объяснения. Мне кажется, что теория уплотнения воздуха в районе передней кромки лучше соответствует известным нам фактам. Она не привязана к «замкнутой системе». Воздух способен двигаться очень быстро. Системы давления ведут себя так же, как большинство систем, о которых мы знаем, — давление движется от высокого к низкому. В чем могут быть проблемы такой теории?

Проблема лишь одна. Большое количество пилотируемых самолетов и истребителей имеет крылья с одинаковым профилем по верхней и нижней кромке (иными словами, одинаково изогнутые). Но им все равно удается создавать подъемную силу. Каким образом это можно объяснить? При этом следует учитывать, что такие самолеты способны летать вверх тормашками, нижней кромкой крыла вверх, на низких и высоких скоростях. Еще одна группа теоретиков

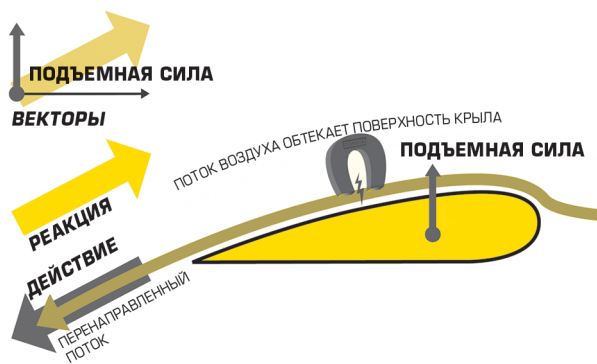
полета настаивает на том, что все дело в отражении воздушного потока.

## НЬЮТОН? ИСААК НЬЮТОН?

Что произойдет, если вы, сидя в движущемся автомобиле, высунете руку в окно? Воздух, подталкивая руку снизу, заставляет ее подниматься подобно воздушному змею. Именно благодаря этому эффекту спортивно-пилотажные самолеты могут набрать большую высоту. В значительной степени это зависит от конструкции симметричного крыла, которая не могла бы обеспечить подъем, если бы крыло было расположено параллельно воздушному потоку.

Если вы помните, чуть выше мы доказали, что если крыло в верхней части изогнутое, а в нижней — плоское, то воздух в верхней части будет двигаться быстрее, чем в нижней. Это заставляет воздух у задней кромки крыла двигаться вниз в момент соскальзывания. Кто-то считает, что полет — это следствие ньютоновского закона действия и противодействия. Воздух устремляется вниз, толкая крылья вверх. На рисунке 17 я попытался изобразить ньютоновскую теорию в действии.

Эта система описывает механизм, заставляющий воздух менять направление движения. Если добавить сюда соображения, связанные с влиянием угла атаки, мы можем получить вменяемую теорию. Я люблю простоту. Однако даже эта теория не может в полной мере помочь нам понять, что происходит с низким давлением в верхней части крыльев, имеющих изогнутую поверхность.



**Рис. 17.** Ньютоновская теория действия и противодействия — воздух, следующий форме крыла, срывается с задней кромки и устремляется вниз. Вследствие этого крыло поднимается вверх

## ЭФФЕКТ КОАНДЫ

Опять же во имя науки прошу вас найти или купить большой надувной мяч для пляжных игр. С его помощью мы проведем следующий эксперимент. Попробуйте представить себе, что произойдет, если вы бросите мяч вперед, сильно закрутив его при этом в обратном направлении. Не бойтесь, поначалу я тоже ошибся в своих предсказаниях.

Немного теории. **Эффект Коанды** описывает движение воздуха (или жидкости) при соприкосновении с определенной поверхностью. Классическая демонстрация этого эффекта — отклонение движения воды при соприкосновении с нижней поверхностью обычной ложки. Если вы никогда не играли с ложкой в потоке воды, попробуйте сделать это сейчас или посмотрите на рисунок 18. С помощью ложки вы можете значительно изменить направление водяного потока. Попробуйте сами — я подожду.

Возможно, что ключ к пониманию механики подъемной силы как раз и связан с пониманием того, как движется вода или воздух при соприкосновении с поверхностью ложки, крыла или пляжного мяча.

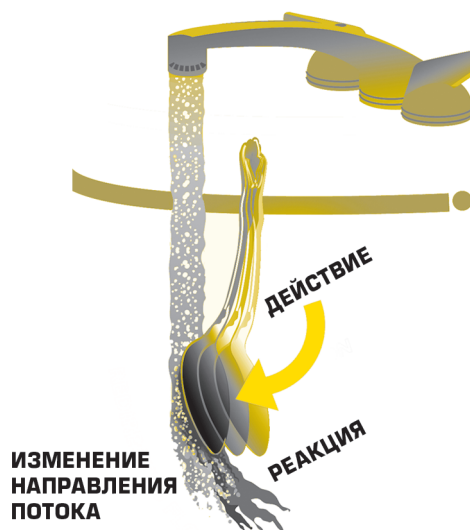
Воздушный поток пытается *прикрепиться* к поверхности мяча. Объяснить это на словах несколько сложно, поэтому лучше посмотрите на рисунок 19. Крошечные частицы воздуха цепляются к поверхности мяча и сталкиваются с поступающим потоком, что приводит к замедлению потока в нижней части мяча. Верхняя часть мяча движется в том же направлении, что и воздушный поток, и это помогает воздуху двигаться быстрее и дольше цепляться за поверхность мяча. В результате наверху возникает меньшее давление, и поток воздуха отклоняется вниз. Мяч начинает лететь вверх! Именно такой эффект

заметен в бейсболе. Мяч движется в сторону от направления на цель. Точно таким же образом происходит движение по кривой мячей для гольфа (хотя, честно скажу, я так и не смог объяснить этот механизм одному своему товарищу во время серии ударов).

Очевидно, что полет — это сложный процесс. Возможно, нам стоит рассматривать сразу несколько идей. Классическая ситуация: мы смотрим на имеющиеся у нас факты, создаем работающую модель, а затем ее тестируем. Сама идея того, что факты должны соответствовать сразу нескольким теориям, ничуть не пугает людей, знакомых с научным методом. Именно так работает наука. Пусть победит сильнейшая теория!

## НЕИССЛЕДОВАННАЯ ТЕРРИТОРИЯ

Причинно-следственные теории — это еще не устоявшееся научное знание. Особенно это справедливо для объектов с небольшими крыльями, например бумажных самолетов. Благодаря тщательным наблюдениям и измерениям мы получили очень хорошие математические модели, способные с невероятной степенью точности предсказать, каким образом будет себя вести большое крыло определенной формы и изгиба — насколько



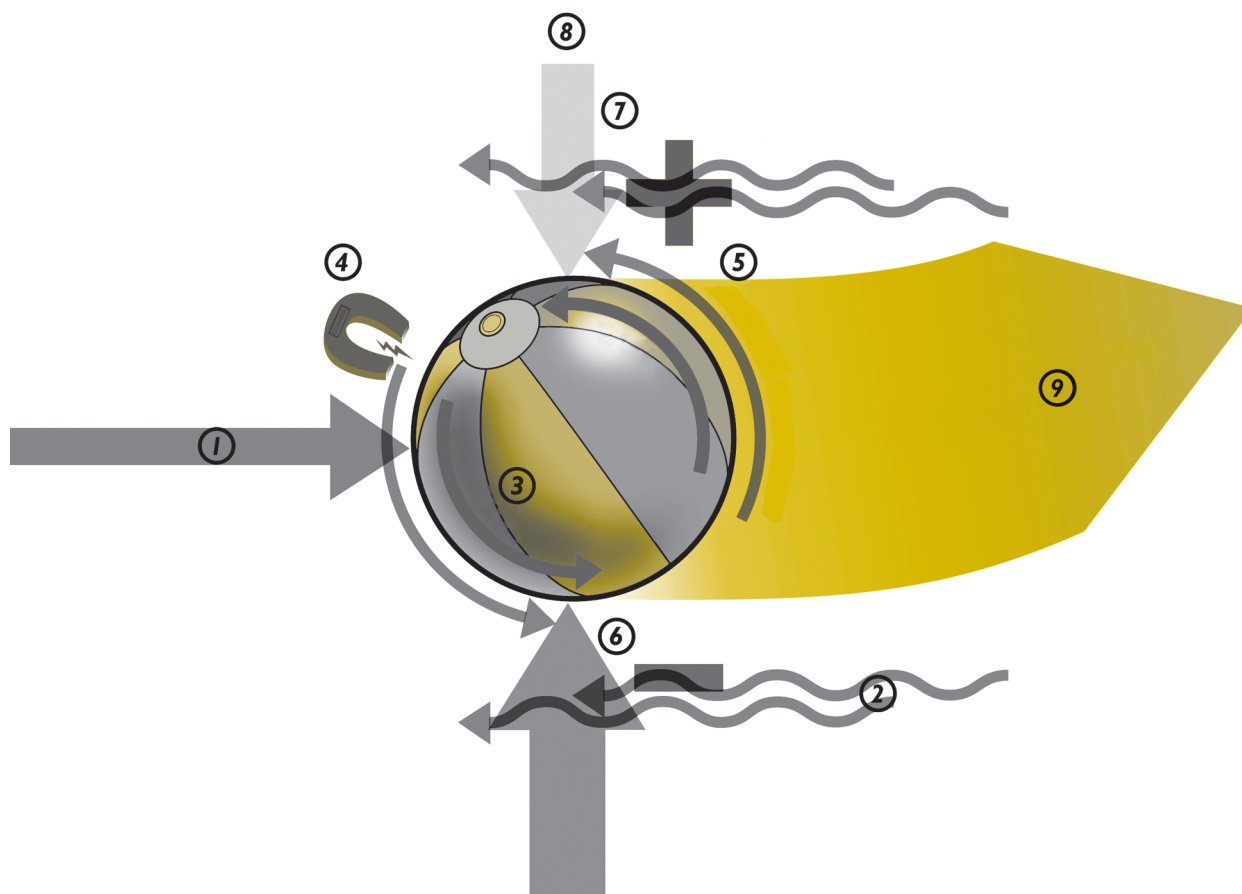
**Рис. 18.** Эффект Коанды в действии — воздух по всей поверхности крыла пытается следовать его форме. Это и называется эффектом Коанды. Используя ложку и струйку проточной воды, вы можете воспользоваться эффектом Коанды для изменения направления потока. Обратите внимание на то, что мы используем для этого нижнюю (выпуклую) сторону ложки

высоко оно поднимется и когда наступит сваливание. Кое-кто полагает, что этих знаний вполне достаточно. Они считают, что все остальное — дискуссии на вечную тему «Что было раньше — курица или яйцо?». Но как быть с любопытством, свойственным истинным ученым?

Самое интересное в отношении бумажных самолетов — то, что по мере уменьшения размера крыльев воздушный поток становится менее упорядоченным. Масштабные модели не отражают реальных свойств объекта и не позволяют оценить

поведение реального объекта в схожей ситуации. И мы оказываемся на самом дальнем форпосте страны, именуемой теорией полетов.

То, что мы наблюдаем, документируем и доказываем, может со временем привести к пониманию особенностей полета больших самолетов. И об этом следует помнить всякий раз, когда вы в школе тестируете свои новые модели самолетов. Научное любопытство — неплохой аргумент, если ваш самолет стукнулся о доску или, не дай бог, влетел в учителя.



**Рис. 19.** Эффект Коанды и эксперимент с мячом: 1 — бросок мяча вперед с определенной скоростью; 2 — противодействующий поток воздуха; 3 — вращение; 4 — эффект Коанды — воздушный поток «прилипает» к поверхности и трение захватывает часть потока с собой; 5 — направление движения поверхности; 6 — направление движения поверхности за вычетом встречного потока — уменьшение воздушного потока; 7 — направление движения поверхности с добавлением встречного потока — увеличение воздушного потока; 8 — общее увеличение воздушного потока — снижение воздушного давления; 9 — направление полета