

# Почему они летят строем

**В. ВЫШИНСКИЙ**

МОЙ ДЕД РАССКАЗЫВАЛ, ЧТО СОЛДАТЫ ВО ВРЕМЯ долгих ночных переходов умудрялись спать на ходу в строю... Они делали это по очереди, опираясь на соседа. Может быть, именно поэтому птицы, совершая дальние перелеты, соблюдают строй, летя «пеленгом» или «клином»? Наверное, в этом есть резон, однако имеются и другие причины.

Известно, что птицы экономят энергию при полете строем. Действительно, данные телеметрии показывают, что в этом случае частота сердечных сокращений снижается по сравнению с одиночным полетом. Об этом же говорят и данные летных экспериментов при полете самолетов «пеленгом», когда, например, левое крыло последующего самолета находится в восходящем потоке правого концевой вихря предыдущего самолета. Так, при полете истребителей с интервалом около 90 м экономия топлива второго самолета из-за снижения сопротивления составляет 10–20% (в зависимости от высоты полета), что позволяет увеличивать дальность полета второго самолета на 180–230 км. Специалисты NASA работают над проектом, в котором автоматическая система управления, используя глобальную спутниковую позиционную систему, позволяющую определять положение самолета с точностью до 10 см, должна формировать устойчивый строй самолетов.

Для объяснения физики явления сначала отметим тот факт, что в ядре вихря давление падает и это падение давления может быть весьма существенным. Оно организует вращательное движение воздуха, являясь источником центробежной силы. Смерч (торнадо) поднимает автомашины, срывает крыши с домов, а вихревой след самолета подобен двум горизонтальным торнадо. Такое образное сравнение придумали американцы, которым, в силу особенностей природных условий, часто приходится иметь дело со смерчами в обывательской жизни. Разрежение в ядре вихря можно «увидеть». Всплеск весла – и от кромок его лопасти отходит пара вихрей. В их центрах падение гидростатического давления приводит к образованию воронок на воде.

Теперь поговорим о вихревой системе самолета. При определенных условиях на большой высоте виден вихревой след самолета. Он может быть «живым», и вы видите, как он извивается. Это происходит тогда, когда частицы, «трассирующие» след, движутся вместе с вихрями. Бывает и так, что вихри, сформировав след, уходят вниз, а след долго сохраняется в атмосфере, «курчавясь» под действием атмосферной турбулентности. «Трассером» является водный конденсат продуктов сгорания двигателей. Вихри, имея разрежение в ядрах, засасывают в себя микрокапли этого конденсата, делая след видимым.

Вихри в следе за крылом имеют противоположные направления вращения: правый (если смотреть сзади на пролетевший самолет) вращается против часовой стрелки, левый – по часовой стрелке (рис.1). Вихри не могут просто так обрываться в атмосфере – они либо заканчиваются на твердой

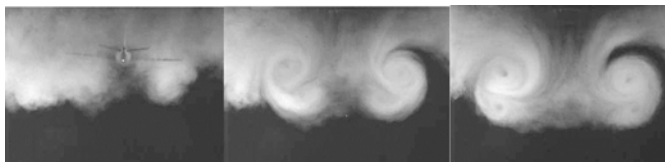


Рис.1. Вихревая пелена за крылом сворачивается в пару вихрей

поверхности, либо уходят на бесконечность. Вокруг крыла организуется циркуляционное движение, такое, что в первом приближении его вихревую систему можно смоделировать П-образным вихрем (рис.2). Крыло как бы разрезает атмосферу, оставляя «надрез» в виде пары вихрей. При этом

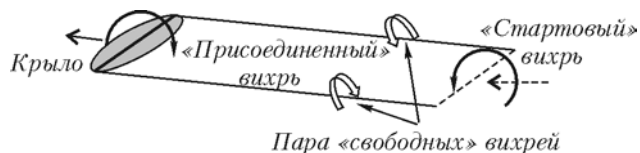


Рис.2. Вихревая схема крыла в первом приближении

создается дополнительная сила сопротивления. Работа против этой силы равна кинетической энергии порожденного вихревого движения.

Есть различные экспериментальные устройства, снабженные измерительными приборами, которые позволяют измерять поля скоростей и давлений. Так, в аэродинамических и гидродинамических трубах движется поток, а исследуемая модель и измерительное оборудование неподвижны. В скоростных трассах, гидроканалах и катапультных установках модель движется в неподвижной среде, а измерители установлены на модели или в контрольном сечении (пример дымовой визуализации приведен на рисунке 1). Есть еще летный эксперимент, но он дорог и не всегда безопасен. Иногда удается провести исследования «даром» – надо только быть достаточно любознательным и иметь под рукой фотоаппарат, а интересное можно увидеть, например, даже в кино (рис.3; здесь отчетливо видно вращательное движение воздуха в следе за правым крылом). Опыты и наблюдения расскажут очень многое пытливому исследователю: качественно все процессы, связанные с образованием подъемной силы, можно увидеть вооруженным или невооруженным глазом.



Рис.3. Кадр из фильма «Крепкий орешек»

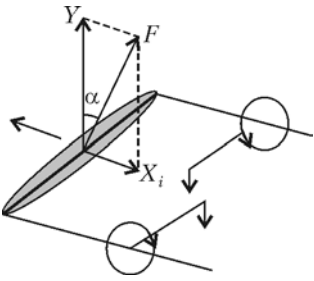


Рис.4. Схема возникновения индуктивного сопротивления

ря) и к повороту вектора аэродинамической силы  $\vec{F}$  на некоторый угол  $\alpha$  (рис.4). Теперь уже сила не перпендику-

Итак, заменим вихревую систему самолета П-образным вихрем (такая упрощенная схематизация использовалась на заре авиации, используется и сейчас в учебных курсах на начальном этапе изучения аэродинамики самолета). Наличие свободных вихрей приводит к скосу потока в области крыла (в нашей схематизации – присоединенного вих-

лярна набегающему потоку, а имеет составляющую  $\vec{X}_i$  против направления полета, которая называется индуктивным сопротивлением. Чем интенсивнее свободные вихри и чем меньше размах крыла, тем больше скос и выше индуктивное сопротивление.

Посмотрим теперь, что происходит, когда самолеты находятся в возмущенном потоке. Если самолеты расположены «пеленгом», то скос потока в области конца крыла последующего самолета будет меньше, а значит, индуктивное сопротивление на этой части крыла будет ниже.

Предлагаем читателю самостоятельно рассмотреть случай полета «клином» – здесь выигрыш будет достигаться для двух последующих самолетов.

## Разглядывая шариковую ручку

А.СТАСЕНКО

ОДНАЖДЫ, ВНИМАТЕЛЬНО СЛУШАЯ ЛЕКЦИЮ ПО ОПТИКЕ и разглядывая свою шариковую ручку с шестигранным прозрачным корпусом, Студент заметил, что стержень с пастой меняет свой видимый диаметр в зависимости от угла поворота. «Э, брат, – подумал Студент, – тут все дело в преломлении лучей». Но, как сказал Лектор, еще во втором веке Клавдий Птолемей описал явление преломления света в трактате «Оптика», а его последователи даже предложили связь между углами падения  $\alpha$  и преломления  $\beta$  в виде  $\frac{\alpha}{\beta} = n$ , где  $n$  – постоянная величина, называемая коэффициентом преломления. Это верно, конечно, только для малых углов, а для любых углов неверно. Потому что правильный закон преломления  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$  лишь в семнадцатом веке изложил в своих лекциях (в Лейдене) Виллеброрд Снеллиус.

Но что же ручка? «Нельзя ли, – подумал Студент, – узнать коэффициент преломления пластмассы, из которой сделан ее корпус?» И приступил к делу.

Разобрав ручку, он прежде всего измерил геометрические размеры – радиус стержня  $r$ , внутренний радиус корпуса  $R$ , расстояние между внешними параллельными гранями  $b$  (рис.1), – благо под руками была тетрадь в клетку, правда не самый точный инструмент.

Были отмечены два интересных результата наблюдения: вдоль линии  $A1O$  (перпендикулярно грани) стержень казался тоньше реального размера ( $r' < r$ ), а вдоль линии  $BCO$  (луч проходит через диаметрально противоположные ребра) – казался самым толстым.

Начнем с первого случая. Так как наблюдение ведется с расстояния порядка 300 мм, то самый большой (внешний) поперечный размер ручки  $b \sim 8$  мм мал по сравнению с этим расстоянием, не говоря уж о диаметрах внутренних цилин-

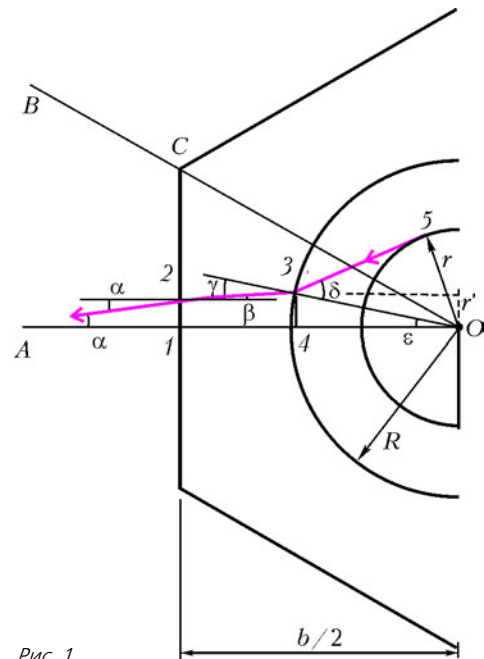


Рис.1

дров. Рассмотрим луч 532A, который несет в глаз информацию о размере стержня. Углы  $\alpha$  и  $\beta$  малы, так что здесь птолемеевцы могли бы порадоваться:  $\frac{\alpha}{\beta} \approx n$ . По этой же причине отрезок луча 23 почти параллелен отрезку 14 (ведь  $\beta$  еще меньше, чем малый угол  $\alpha$ ), так что длины отрезков 12 и 34 почти равны друг другу и кажущемуся радиусу  $r'$ , а  $\angle \gamma \approx \angle \epsilon$ . Отсюда следует

$$\frac{r'}{AO} = \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha, \quad \frac{\sin \delta}{\sin \gamma} = n \approx \frac{\sin \delta}{\sin \epsilon} \approx \frac{\sin \delta}{r'/R} \approx \frac{\sin \delta}{AO \cdot \alpha/R}.$$

Но треугольник  $O53$  – прямоугольный, поскольку отрезок 35 – касательная к окружности стержня, поэтому  $\sin \delta = \frac{r}{R}$ . В результате получаем

$$n \approx \frac{r}{AO \cdot \alpha} = \frac{r}{AO \cdot r'/AO} = \frac{r}{r'}.$$

Измерив  $2r \approx 2,5$  мм и  $2r' \approx 1,5$  мм, находим  $n \approx 5/3$ .

«Э, – ведь это коэффициент преломления такого прекрасного стекла, как тяжелый флинт,» – подумал Студент и решил для уверенности рассмотреть второй случай – направ-

(Продолжение см. на с. 34)