

ЗООЛОГИЯ

УДК 595.7 : 591.174

А. К. Бродский, В. П. Иванов

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛЕТА НАСЕКОМЫХ**III. ОБТЕКАНИЕ КРЫЛЬЕВ ПОДЕНКИ*****EPHEMERA VULGATA* L. (EPHEMEROPTERA)¹**

Настоящая работа, в отличие от двух предыдущих в этой серии, посвящена анализу некоторых особенностей обтекания крыльев одного из примитивных видов насекомых — поденки *Ephemera vulgata* L. Измерение подъемной силы и лобового сопротивления переднего крыла насекомого (Бродский, 1970) выявило одну интересную особенность — обтекание крыла при закритических углах атаки не сопровождается, как этого следовало бы ожидать по аналогии с крыльями самолетов и птиц, резким падением подъемной силы, хотя лобовое сопротивление крыла возрастает значительно. Было сделано предположение о влиянии гофрировки крыла на поведение обтекающего потока воздуха. Для выяснения механизма этого влияния и проводится настоящее исследование.

Материал и методика

Для получения дымовых спектров использовались свежие крылья поденок, отловленных незадолго до начала эксперимента. Крылья прикреплялись к державке координатника и помещались в дымовую аэродинамическую трубу. Особое внимание было уделено сохранению стационарного режима обтекания: крылья вносились в уже установившийся поток, и фотосъемка производилась только тогда, когда колебания воздуха, вызванные внесением крыльев, затухали. Вся последующая процедура опыта не отличалась от уже описанной (Бродский, Иванов, 1974).

Результаты

Изучение дымовых спектров переднего крыла в диапазоне углов атаки от 0 до 50° показывает, что при достижении угла атаки, равного приблизительно 25°, струи, обтекающие крыло, начинают сворачиваться в вихрь. Этот вихрь расположен в проксимальной части крыла, имеет овальную в плане форму и сильно уплощен дорсовентрально. Увеличение угла атаки сверх критического приводит к тому, что этот вихрь разрастается и становится вышуклым. Дальнейшее увеличение угла атаки сопровождается его распадом на три крупных вихря, занимающих положение, показанное на рис. 1, А. За этими вихрями расположен четвертый, общий вихрь.

Струи, обтекающие крыло при этом угле атаки, распадаются на два потока: один отклоняется к основанию, другой — к вершине крыла.

¹ Продолжение. Начало см.: Вестн. Ленингр. ун-та, 1973, № 15, с. 17—20.

Aerodynamic aspects of insect flight: III. The vortex of wings of *Ephemera vulgata* L. (*Ephemeroptera*)

Вершинный пучок струй попадет на гофрировку крыла и по жилкам радиуса сектора отклонится к вершине (рис. 1, А). Аналогичное явление наблюдается и на нижней стороне крыла. Однако здесь струи отклоняются на меньший угол. Кроме того, струи, стекающие по нижней стороне, начинают за крылом подниматься вверх (рис. 2, А). В результате струи перекручиваются, что наблюдается при всех углах атаки, включая и докритические.

Таким образом, срыв потока с крыла поденки происходит почти при тех же углах атаки, что и у авиационных профилей, крыльев птиц, а также крыльев одного из видов насекомых — пустынной саранчи (Jep-

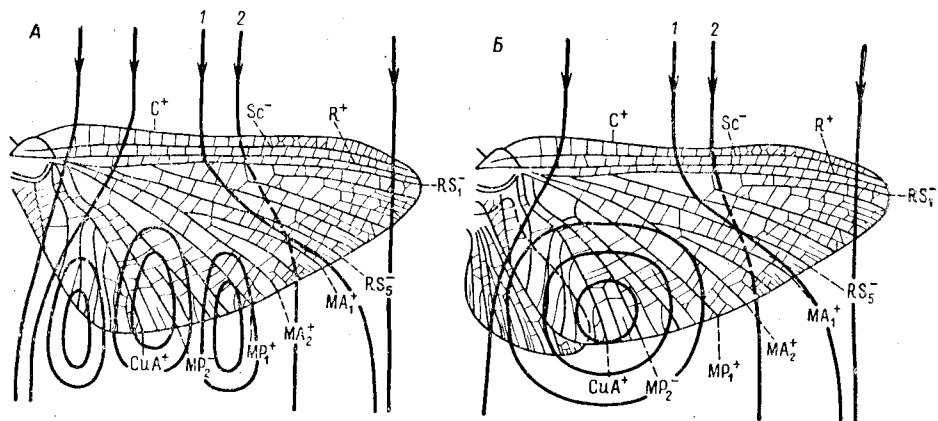


Рис. 1. Картины обтекания крыльев поденки в плане.

Угол атаки 44° . Скорость набегающего потока 2 м/с. 1 — струя, стекающая по верхней поверхности крыльев; 2 — струя, стекающая по нижней поверхности крыльев (то же для рис. 2). Знаками $+^+$ и $-^-$ обозначены выпуклые и вогнутые жилки соответственно. Жилки: C — костальная, Sc — субкостальная, R — радиальная, RS₁ и RS₅ — первая и пятая ветви радиального сектора, MA₁ и MA₂ — передняя и задняя ветви первой медиальной жилки, MP₁ и MP₂ — задние медиальные, CuA — кубитальная (то же для рис. 3). А — правое крыло; Б — правая пара крыльев.

sep, 1956). Однако гофрировка крыльев поденки направляет поток в обход образовавшегося небольшого плоского вихря, и, следовательно, вихрь лишь незначительно ухудшает аэродинамические качества крыла. В результате подъемная сила не падает или падает лишь незначительно, хотя лобовое сопротивление крыла возрастает (Бродский, 1970). Но это не единственный возможный способ влияния гофрировки на характер обтекания крыла.

Для того чтобы рассмотреть еще один аспект влияния гофрировки крыла на поведение обтекающих струй воздуха, следует обратиться к обтеканию пары крыльев одной стороны тела поденки. Редукция задних крыльев является широкораспространенным явлением в эволюции этих насекомых. Наиболее мелкие формы, такие, как представители семейства *Caenidae* и некоторые виды семейства *Baetidae*, вообще лишены задней пары крыльев. Более крупные формы сохраняют значительно редуцированные, но еще подвижные задние крылья. Не анализируя причины сохранения задних крыльев у более крупных форм, следует отметить различия в обтекании одного крыла и пары крыльев. Прежде всего видно, что формирующийся вихрь имеет более плоскую форму в случае пары крыльев (рис. 2, Б). Этот вихрь с возрастанием угла атаки не распадается на три вихря: увеличение угла атаки сопровождается ростом вихря, который может занимать почти всю поверхность крыла, но неизменно сохраняет плоскую форму (рис. 1, Б).

Струи, обтекающие дистальную часть пары крыльев, также ведут себя differently от того, что мы наблюдаем в случае одного крыла (рис. 2). Струи, стекающие по верхней поверхности крыльев, видимо обладают большей скоростью, так как покинув крыло лишь незначительно меняют свое начальное направление. Струи, стекающие по нижней поверхности крыльев, раньше и заметнее начинают подниматься вверх за крыльями. Это, возможно, связано с влиянием вихря, оказывающего подсосывающее действие на нижние струи, незначительно отклоняемые гофрировкой крыла к его вершине.

Более плоскую форму вихря, наблюдаемую в случае пары крыльев, объяснить трудно. Возможно, что одной из причин является подсос воздуха на заднем крае переднего крыла. Заднее крыло приходится на максимум ширины переднего и образует с ним щель, величина просвета

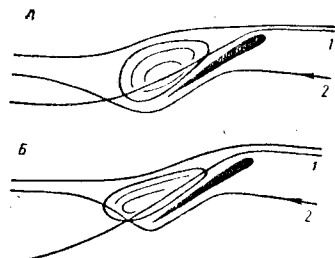


Рис. 2. Картины обтекания крыльев поденки.

Вид сбоку. Угол атаки 36° . Скорость набегающего потока 2 м/с. А — правое крыло; Б — правая пара крыльев.

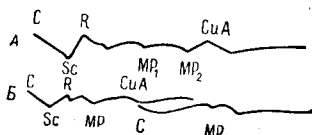


Рис. 3. Профиль переднего и заднего крыльев.

А — на расстоянии 0,45 см от основания крыльев; Б — на расстоянии 0,18 см от основания крыльев.

которой, как показывают вычисления, соизмерима с толщиной пограничного слоя (рис. 3). Под действием разности давлений на нижней и верхней поверхности крыла воздух устремляется через щель в область над крылом, в результате чего на верхней поверхности крыла создается дополнительный поток, воздействующий на вихрь.

Таким образом, видно, что на направление струй воздуха, обтекающих крылья поденки, оказывают влияние не только гофрировка, но и вихри, приуроченность которых к определенным участкам крыла, как нам думается, также определяется характером поверхности крыльев, т. е. гофрировкой.

Обсуждение

Частота колебания крыльев — одна из наиболее примечательных черт полета насекомых — может достигать нескольких сотен взмахов в секунду. Поэтому аэродинамика крыла насекомого отлична от аэродинамики его тела. Для описания аэродинамических движителей нестационарного типа, каковым является крыло насекомого, до сих пор не создано сколько-нибудь приемлемой аналитической теории. В цикле взмаха крыла всегда есть моменты, характеризующиеся стационарными и нестационарными режимами обтекания. Нестационарность обтекания крыльев связана не столько с ускорением и торможением последних на дне и вершине удара, сколько с быстрым изменением ориентации крыльев в некоторые моменты взмаха. Однако в средней части удара вниз при поступательном полете насекомого с невысокой частотой взмаха крыло сравнительно долго может работать в режиме стационарного обтекания.

При исследовании обтекания крыльев поденки мы старались рассмотреть именно эту ситуацию. Но и она отличается от той, которая имеет место в свободном полете. Прежде всего, мы имели дело с крыльями, неподвижно закрепленными в потоке воздуха, и, следовательно, не было градиента скорости потока воздуха и угла атаки крыла по его длине. Кроме того, крылья были лишены естественного скручивания, которое наблюдается на протяжении большей части удара вниз. И, наконец, комбинация выпуклых и вогнутых жилок соответствовала таковой крыла, находящегося в покое, тогда как в полете характер гофрировки непрерывно меняется в различные моменты цикла взмаха.

Однако уже то, что нам удалось увидеть, показывает еще одно интересное и неожиданное решение проблемы стабилизации подъемной силы, развиваемой насекомыми в полете. Работа крыла при закрытических углах атаки выгодна для насекомого, так как при этом достаточно высокая подъемная сила развивается в широком диапазоне углов атаки. Способы достижения этого могут быть различными. Так, волоски на заднем крае крыла плодовой мушки препятствуют подворачиванию струй и свертыванию их в вихрь (Vogel, 1967). Чешуйки крыльев дневных бабочек турбулизируют пограничный слой, в результате чего он прилипает к поверхности крыла и образование вихря сдвигается вдоль по потоку (Nachtigall, 1965). Поденки представляют третий вариант решения этой проблемы: гофрировка и щель между передним и задним крыльями дают возможность крылу работать при углах атаки, при которых вихрь уже начал формироваться.

Как мы видим, во всех трех случаях используются разные принципы стабилизации подъемной силы, связанные с использованием различных структур крыла. Думается, что этим далеко не исчерпывается многообразие приспособлений подобного рода, что говорит о перспективности исследований, направленных на выяснение аэродинамической функции самых разнообразных структур крыльев насекомых. Кроме того, следует подчеркнуть еще одно положение, косвенно вытекающее из настоящего исследования, а именно вихри, почти неизбежно возникающие при полете насекомых, возможно, не всегда играют отрицательную роль. Следует вспомнить, что эти вихри обладают большей устойчивостью (Бродский, Иванов, 1974), и, следовательно, могут возникать ситуации, когда вихри помогают достижению каких-то определенных полетных качеств насекомых, что, разумеется, должно быть связано с чрезвычайно тонкими приспособлениями, позволяющими управлять распределением и формой возникающих вихрей.

Summary

By using the smoke spectra it was shown that the formation of a vortex had taken place at the angle of attack of about 25°. The vortex and a wing pleating influence on the direction of currents on the wing surface. The action of wing pleating and a gap between the fore and hind wings provides the stability of the lift.

ЛИТЕРАТУРА

- Бродский А. К. О роли гофрировки крыльев насекомых. — Журн. эволюц. биохим. и физиол., 1970, т. 6, с. 470—471.
- Бродский А. К., Иванов В. П. Аэродинамические особенности полета насекомых. II. Спектры обтекания. — Вести. Ленингр. ун-та, 1974, № 3, с. 16—21.
- Jensen M. Biology and physics of locust flight. III. The aerodynamics of locust flight. — Philos. Trans. Roy. Soc. Lond. 1956, ser. B, N 667, vol. 239, p. 511—552.
- Nachtigall W. Die aerodynamische Funktion der Schmetterlingsschuppen. — «Naturwissenschaften», 1965, Bd. 52, H. 9, S. 216—217.
- Vogel S. Flight in *Drosophila*. III. Aerodynamic characteristics of fly wings and wing models. — J. Exp. Biol., 1967, vol. 46, N 3, p. 431—443.

ВЕСТНИК ЛЕНИНГРАДСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С 1946 ГОДА

Выходит 24 раза в год, по четыре номера каждой серии

3

БИОЛОГИЯ

Выпуск 1

ФЕВРАЛЬ

1975



ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛЕНИНГРАДСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ЛЕНИНГРАД