

УДК 595.7 : 591.174

А. К. Бродский, В. П. Иванов

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛЕТА НАСЕКОМЫХ

I. ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА

Длительная эволюция класса насекомых определила разнообразие типов и форм их крыловых аппаратов. Приспособление к полету отразилось не только на крыле, как органе полета, но и на всей организации насекомых. Однако в силу сложившегося стандартного подхода к изучению полета насекомых — анализ работы крыльев — мало кто из исследователей обращал внимание на аэродинамику тела насекомого. Между тем из сил, действующих на насекомое в полете, основные «мешающие» силы создает тело — это вес и лобовое сопротивление.

В настоящее время существует лишь самое общее представление относительно того, каковы основные закономерности взаимодействия потока воздуха с телом насекомого, какую роль играет в этом форма тела, взаимное расположение его частей и т. д. Выяснение аэродинамических особенностей тела насекомых, следовательно, является актуальной проблемой изучения полета насекомых. В этой и последующей статьях мы коснемся некоторых моментов рассматриваемой проблемы.

Полет насекомых, вследствие их небольших размеров и низкой скорости полета, происходит в сравнительно узком диапазоне малых чисел Рейнольдса. Число Рейнольдса является одним из важнейших критериев подобия, учитывающим влияние линейных размеров и скорости на поведение обтекающего тело потока воздуха. Известно, что при малых числах Рейнольдса имеет место поток с ламинарным пограничным слоем и ламинарным течением позади тела (Красноперов, 1935). При больших числах Рейнольдса наблюдается течение с частично турбулентным пограничным слоем и правильно расположенными за телом вихрями. При дальнейшем возрастании чисел Рейнольдса вихревые дорожки становятся нерегулярными и течение приобретает ярко выраженный турбулентный характер.

В зависимости от режима обтекания меняется характер изменения коэффициента лобового сопротивления как функции от числа Рейнольдса. Резкое падение сопротивления наблюдается при переходе пограничного слоя из ламинарного в турбулентный. Число Рейнольдса, при котором происходит это явление, принято называть критическим. Таким образом, на основании характера изменения коэффициента лобового сопротивления можно получить представление о принципиальной картине обтекания тела насекомого.

Материал и методика

Измерение лобового сопротивления тела проводилось на насекомых — представителях шести различных отрядов: стрекозе *Aeschna mixta* Latr., поденке *Ephemera vulgata* L., цикаде *Tibicen plebeja* Scop.,

бражнике *Amorpha populi* L., шершне *Vespa crabro* L. и мухе *Sarcophaga carnaria* L. Перед продувкой из сухого материала были отобраны по одному экземпляру каждого вида, сохранявшему полетное положение брюшка. Крылья, ноги, а у поденки, кроме того, хвостовые нити были удалены.

Методика измерения лобового сопротивления отличалась от уже описанной (Бродский, 1971) тем, что для достижения большей устойчивости потока было изменено положение решеток в аэродинамической трубе.

Коэффициент лобового сопротивления определялся по формуле:

$$C_x = Q/1/2\rho SV^2,$$

где Q — лобовое сопротивление в ньютонах, ρ — плотность воздуха в $кг/м^3$, V — скорость движения воздуха относительно объекта в $м/сек$, S — лобовая площадь, т. е. площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению потока в $м^2$.

Число Рейнольдса определялось по формуле:

$$Re = Vd/\nu,$$

где V — скорость движения воздуха относительно объекта в $м/сек$, ν — кинематическая вязкость в $м^2/сек$, d — вертикальный диаметр лобовой проекции в $м$.

Все измерения проводились при температуре воздуха $20\pm 2^\circ C$ и давлении 760 $мм$ $рт.$ $ст.$ Плотность воздуха — $1,21$ $кг/м^3$, кинематическая вязкость воздуха — $1,49\cdot 10^{-6}$ $м^2/сек$.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 и 2 представлены результаты измерений лобового сопротивления тел различных насекомых при нулевом угле атаки. Видно, что цикада обладает наиболее высоким коэффициентом сопротивления, тогда как коэффициенты сопротивления остальных насекомых близки друг к другу.

Излом на кривых сопротивления бражника, шершня и мухи указывает на отчетливое изменение характера обтекания этих насекомых. В некотором диапазоне скоростей сопротивление, до этого падавшее с увеличением чисел Рейнольдса, начинает возрастать. Уменьшение коэффициента лобового сопротивления этих насекомых, видимо, связано с перестройкой пограничного слоя. Иными словами, происходит кризис обтекания.

Согласно положению аэродинамики, число Рейнольдса достигает критической величины, когда тело имеет довольно крупные размеры или движется очень быстро. Критическое число Рейнольдса для шара, цилиндра лежит где-то между 2×10^5 и 2×10^6 (Александр, 1970). Тело насекомого не может быть сведено к таким простым телам, как шар или цилиндр. Но для эллипсоидов и хорошо обтекаемых тел вращения кризис обтекания наступает также при значительно больших числах Рейнольдса, чем у насекомых. Вместе с тем установлено, что вытягивание эллипсоидов по оси вращения сопровождается уменьшением чисел Рейнольдса, при которых наблюдается кризисный режим обтекания (Prandtl, 1914; Riabouchinsky, 1929). По данным С. М. Горлина (1970), наличие вертикальных гребней на поверхности тела также ведет к уменьшению критического числа Рейнольдса. На подобное значение неправильных шероховатостей указывает и А. К. Мартынов (1958). Следовательно, возможно наличие кризиса обтекания у насекомых при чи-

слах Рейнольдса, меньше тех, при которых он наблюдается у более простых форм.

У цикады, поденки и стрекозы не отмечено столь явного изменения сопротивления, которое характерно для бражника, шершня и мухи. Относительно цикады трудно судить о том, действительно ли у нее отсутствует в исследованном диапазоне скоростей кризис обтекания; кривые же поденки и стрекозы образуют лишь слабые изгибы. У обоих насекомых тело заметно выделяется неравномерной толщиной груди и брюшка при значительном удлинении всего тела.

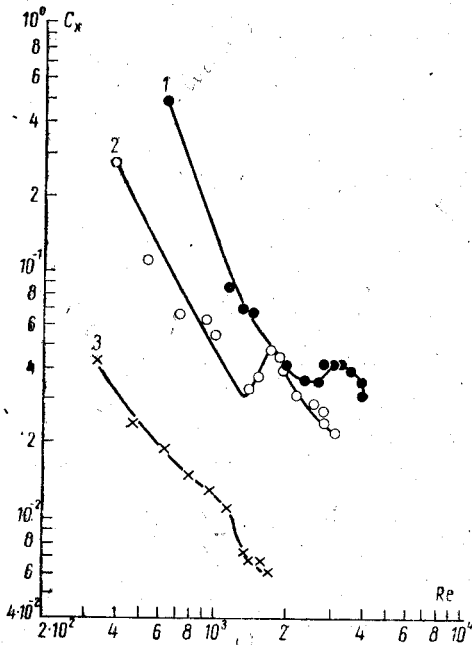


Рис. 1. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса для шершня (1), мухи (2) и поденки (3).

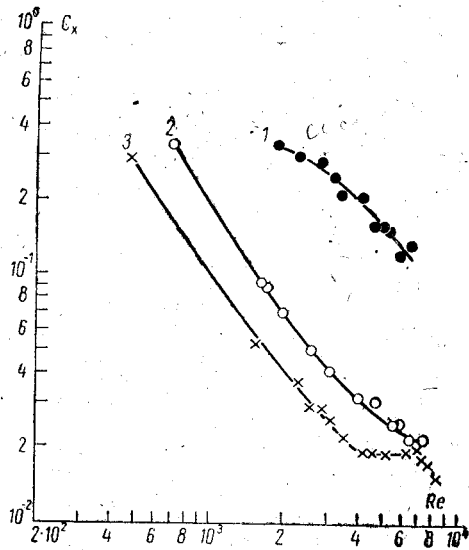


Рис. 2. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса для цикады (1), стрекозы (2) и бражника (3).

Скорость полета одного и того же насекомого в природе может варьировать в значительном диапазоне. Средняя скорость шершня равна 3 м/сек (Weis-Fogh, 1967) и может, по нашим наблюдениям, достигать 8 м/сек. Кризис же обтекания этого насекомого имеет место в области 4,5—5,5 м/сек. Кризис обтекания бражника происходит при скорости 3,5—6,5 м/сек, тогда как его средняя полетная скорость оценивается Шовеном (Chouvin, 1956) в 15 м/сек и нами на основе наблюдения над полетом бражника *Atorpha populi* в 10 м/сек. Для мухи скорость полета равна, приблизительно, 5—6 м/сек, а область кризиса для нее получена при 4,5—7,0 м/сек. Иными словами, полетная скорость насекомых может в некоторых случаях быть даже выше, чем скорость, при которой в экспериментальной обстановке наблюдается кризис обтекания.

До настоящего времени единодушно принималось, что полет насекомых происходит в докритической области. Возможность полета некоторых насекомых в области критического режима обтекания говорит о большой сложности взаимодействия потока с телом насекомого. Для более конкретного анализа особенностей обтекания тела насекомого необходимо привлечение его качественной картины.

Выводы

1. Для шести видов насекомых установлена зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса.
2. Из всех исследованных насекомых наибольшее лобовое сопротивление отмечено у цикады, наименьшее — у поденки.
3. При скорости движения воздуха около 5 м/сек у бражника, шершня и мухи отмечен кризис обтекания.

Summary

1. In six species of insects dependence of the parasite drag coefficient on Reynolds number is determined.
2. In all insects studied the highest parasite drag is found in the case of *Tibicen plebeja*, the lowest — in the *Ephemera vulgata* case.
3. With the wind speed about 5 m/sec in the case of *Amorpha populi*, *Vespa crabro* and *Sarcophaga carnaria* the crisis of flowing is determined.

ЛИТЕРАТУРА

- Александр Р. Биомеханика. М., «Мир», 1970, 339 с.
- Бродский А. К. Экспериментальное изучение полета поденки *Ephemera vulgata* L. (*Ephemeroptera*). — Энтом. обозрение, 1971, т. 50, № 1, с. 43—50 с ил.
- Горлин С. М. Экспериментальная аэродинамика. М., «Высшая школа», 1970, 424 с.
- Красноперов Е. В. Экспериментальная аэродинамика. II. Л.—М., ОНТИ НКТП СССР, Главная редакция авиационной литературы, 1935, т. 2, 192 с.
- Мартьянов А. К. Экспериментальная аэродинамика. Государственное издательство оборонной промышленности, 1958, 348 с.
- Chauvin R. Physiologie de l'insecte. Paris, 1956, 917 p.
- Prandtl L. Der Luftwiderstand von Kugeln. — Nachrichten von der Königlichen Ges. der Wiss. zu Göttingen, Mat.-phys., 1914, H. 2, S. 177—190, ill.
- Riaboushinsky D. Sur la resistance des sphères et des ellipsoïdes dans les tunnels. — Bull. Inst. Aerod. Coutsh., 1929, sér. 5, vol. 73, p. 81—86, ill.
- Weis-Fogh T. Respiration and tracheal ventilation in locusts and other flying insects. — Journ. Exper. Biol., 1967, vol. 47, No 3, p. 561—587, ill.

Статья поступила в редакцию 20 октября 1972 г.