

УПРАВЛЕНИЕ ВИБРАЦИОННЫМ ПОЛЁТОМ У ПЧЕЛЫ

А.А. Гришаев

Тайна полёта насекомых – в частности, шмелей, пчёл, ос, мух – до сих пор не известна академической науке. Ранние исследователи полагали, что пчела летит вперёд благодаря особым движениям крылышек, при которых кончик каждого крылышка выписывает “восьмёрку”, так что махи делаются не строго вертикально, а немного назад, причём с соответствующими доворотами плоскостей крылышек – ортогонально направлению маха. Не говоря о том, что такой “гребной” полёт весьма неэкономичен – поскольку “гребки” делаются почти перпендикулярно направлению движения – остаётся неясно, каким же образом насекомое держится в воздухе. Некоторые исследователи полагают, что дело заключается в таких поворотах плоскостей крылышек, что махи вверх совершаются практически без сопротивления, а опора на воздух обеспечивается при махах вниз. Но эта идея противоречит идее “гребного” полёта. Кроме того, на замедленном воспроизведении работы крылышек в режиме зависания пчелы, таких больших (на 90° !) выворачиваний крылышек не просматривается. Это и понятно: у пчелы нет мышц, которые могли бы выворачивать крылышки; и если всё-таки небольшие выворачивания происходят, то они имеют пассивный характер. Ничего не добившись линейными методами, исследователи теперь изучают воздушные вихри, которые возникают при работе крылышек. Но изумительные по красоте картинки этих вихрей не прибавляют понимания физики полёта – поскольку, на наш взгляд, вихри здесь являются *вторичными эффектами*. Таким образом, для науки остаётся загадкой не только то, каким образом пчелы развивают в полёте невероятные скорости (легко догоняют лошадь!) и выполняют фантастические фигуры пилотажа, но даже и то, каким образом они вообще держатся в воздухе.

Между тем, принцип создания вибрационной тяги у насекомых, качественно описанный Л.Лозовским [1], поразительно прост. Этот принцип основан на том, что воздух имеет ненулевую динамическую вязкость. Крылышки насекомого, при маховых движениях вверх-вниз, испытывают аэродинамическое сопротивление, сила которого прямо пропорциональна квадрату скорости махового движения. Если махи вниз совершать немного быстрее, чем махи вверх, то усреднённая сила сопротивления будет направлена вверх – и, при равенстве весу насекомого, она будет удерживать его в воздухе.

Для иллюстрации этого изящного принципа создания “опоры на вязкую среду”, приведём ещё пару примеров. Если лодочник, в лодке на спокойной воде, будет многократно перемещаться с носа на корму шагом, а с кормы на нос бегом, то лодка будет в целом продвигаться вперёд. Поэтому с некоторых пор на соревнованиях по парусному спорту бег на борту запрещён. Ещё пример: для эффектной демонстрации т.н. инерциоидов, их кладут на залитую тонким слоем масла горизонтальную стеклянную поверхность – на которой буксует игрушечный заводной автомобильчик – и инерциоид, трепыхаясь,

“продвигается при нулевом трении”. Увы: продвижение инерциоида в этих условиях основано на обеспечиваемом маховиками различии в средних скоростях болтанки вперёд-назад, что порождает асимметричное взаимодействие с вязким маслом. Можно убедиться в том, что, без такого асимметричного взаимодействия, средняя сила тяги инерциоида равна нулю – для этого нужно использовать не опору, а подвес. Несмотря на трепыхания подвешенного инерциоида, его центр тяжести будет оставаться на месте: подвес в среднем не отклонится.

Вернёмся к вибрационному полёту и, на примере пчелы, покажем, что развиваемая ей вибрационная тяга достаточна для того, чтобы удерживать её в воздухе; а также опишем, каким образом пчела управляет полётом и переключает его режимы.

Приведём выражение для силы вибрационной тяги, возникающей при условии, что длительности махов вверх и вниз немного различаются. Весьма условно крылышко можно рассматривать как тонкую пластинку, вибрирующую в вязкой среде ортогонально своей плоскости, по гармоническому закону $x = A \sin \omega t$. Сила лобового сопротивления, как известно, есть

$$F_{\text{лоб}} = (1/2) C \rho S V^2,$$

где C - безразмерный коэффициент лобового сопротивления, ρ - плотность вязкой среды, S - эффективная площадь поперечного сечения тела, т.е., в нашем случае, площадь пластинки, V - скорость смещения пластинки в вязкой среде. Подставляя в это выражение значение скорости $V = \omega A \cos \omega t$ и усредняя на полупериоде, в течение которого пластинка смещается либо “туда”, либо “обратно”, получаем

$$\langle F_{\text{лоб}} \rangle = (1/4) C \rho S \omega^2 A^2 = C \rho S \pi^2 f^2 A^2,$$

где $f = \omega / 2\pi$ - частота вибраций. Если полупериоды смещений “туда” и “обратно” немного различаются – что даёт соответствующую разность частот Δf – то для средней разностной силы, которую мы и называем силой вибрационной тяги, получаем выражение

$$F_{\text{вибр}} = \Delta \langle F_{\text{лоб}} \rangle = 2\pi^2 C \rho S f \Delta f A^2.$$

Покажем, что при значениях параметров, характерных для работающих крылышек пчелы, сила вибрационной тяги вполне способна удерживать насекомое в воздухе, если длительность махов вниз на 15% короче длительности махов вверх, т.е. если $\Delta f/f = 0.15$.

Пчела весит около 0.1 г, поэтому сила, удерживающая её в воздухе, должна составлять около 10^{-3} Н. Частота вибраций крылышек пчелы изменяется от 200 до 250 Гц. Эффективная площадь одного крылышка составляет около $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, так что $S = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$; половинный размах вибраций есть $A = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Коэффициент лобового сопротивления C определяют эмпирически; он зависит от числа Рейнольдса. К сожалению, нам не удалось разыскать в литературе эту зависимость для случая тонкой пластинки. Поэтому воспользуемся аналогичной зависимостью для случая сферы [2] и учтём, что, при прочих равных условиях, лобовое сопротивление тонкой пластинки больше лобового сопротивления сферы примерно в десять раз [3]. При плотности воздуха $\rho = 1.3 \text{ кг/м}^3$ и его динамической вязкости $1.82 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ [3], характерное для работающих крылышек пчелы число Рейнольдса, соответствующее средней скорости взмаха, составляет $\approx 10^3$. При этом, для случая сферы $C \approx 0.4$ [2], и, значит, для нашего случая $C \approx 4$. Используя названные значения параметров, получаем, что, при различии длительностей махов вверх и вниз на 15%, вибрационная тяга на частоте 200 Гц составляет $0.92 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$, а на частоте 250 Гц – $1.44 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$. Требуемое значение 10^{-3} Н попадает в полученный интервал – и, значит, вибрационная тяга должна удерживать пчелу в воздухе при подходящем выборе частоты вибраций. Кстати, в дополнение к вышеописанному механизму создания вибрационной тяги через асимметрию лобовых сопротивлений, существует еще один механизм – через асимметрию инерциальных сопротивлений т.н. присоединённой массы вязкой среды [2]. Но, в рассматриваемом случае, присоединённая масса воздуха, увлекаемая крылышком, ничтожна, так что главный вклад в создание вибрационной тяги должен давать именно вышеописанный механизм.

Следует оговорить, что приведённый расчёт основан, конечно, на довольно-таки грубых приближениях – за неимением лучшего. Но, надо полагать, что и уточнённые расчёты не отвергнут вывод о способности насекомого держаться в воздухе на вибрационной тяге, причём – при относительно небольшом различии в длительностях махов вверх и вниз, которое не бросается в глаза на замедленном воспроизведении работы крылышек. Уточнённые расчёты, как можно ожидать, подтвердят и вывод о том, что достаточную для полёта вибрационную тягу способны развивать лишь миниатюрные летуны, каковыми являются насекомые: даже при своём сверхмалом весе им приходится использовать частоты вибраций крылышек в сотни герц!

Выбирая необходимую частоту этих вибраций, пчела либо набирает высоту, либо “висит” на одной высоте, либо снижается. Но ещё следует объяснить, каким образом осуществляются горизонтальный полёт и горизонтальные манёвры.

Обратим внимание: центр тяжести пчелы находится в передней части брюшка (кстати, там же расположен медовый зобик – “аналог” бензобака). Места же прикрепления крылышек находятся в средней части груди, т.е. они существенно вынесены вперёд относительно положения центра тяжести. Устойчивая ориентация корпуса в полете, по отношению к плоскости горизонта, достигается при такой геометрии, когда три точки – два эффективных центра вибрационной опоры на воздух и расположенный ниже центр тяжести – находятся в вертикальной плоскости. Такая геометрия была бы невозможна, если пчела

работала бы крылышками, отведёнными от корпуса на прямой угол. Но ситуация выправляется при меньших углах отведения. Более того, существует целый диапазон углов отведения вибрирующих крылышек от корпуса, с соответствующим ему диапазоном углов устойчивой ориентации корпуса по отношению к плоскости горизонта.

На наш взгляд, именно устанавливая необходимый угол отведения вибрирующих крылышек, т.е. устанавливая необходимую “стреловидность”, пчела либо летит назад, либо зависает на месте, либо летит вперёд, причём с меньшей или с большей скоростью. Секрет в том, что, помимо удерживания пчелы в воздухе, вибрирующие крылышки делают ещё нечто. Имея великолепно подобранную гибкость в направлении от крепления к кончику, вибрирующее крылышко “отмахивает” воздух в этом направлении – подобно кончикам маховых перьев у птиц [4]. Факт отбрасывания воздуха вибрирующими крылышками тонко демонстрируется для “наблюдателя”, в сантиметре от щеки которого медленно пролетает комар. Выходит, что вибрирующие крылышки создают пару реактивных сил, которые действуют совместно с силой вибрационной тяги; различные режимы полёта получаются при различных векторах равнодействующей этой тройки сил.

Так, для полёта назад пчела максимально отводит вибрирующие крылышки от корпуса. При этом равнодействующая пары реактивных сил становится весьма мала; а устойчивым положением корпуса оказывается такое, при котором брюшко проваливается, а голова приподнимается, так что вектор вибрационной тяги отклоняется от вертикали назад – горизонтальная компонента этого вектора и обеспечивает нужное перемещение. Соответственно, зависание на месте и полёт вперёд, со всё большей скоростью, получаются при всё большем приведении вибрирующих крылышек к корпусу – в результате ориентация корпуса всё больше приближается к горизонтальной, а направленная вперёд равнодействующая пары реактивных сил всё увеличивается. То есть, при полёте вперёд, вибрационная тяга удерживает пчелу в воздухе, а перемещение происходит благодаря паре реактивных сил.

Чтобы всё происходило именно так, пчела должна иметь, помимо мышц, обеспечивающих махи крылышками вверх и вниз, ещё и мышцы, обеспечивающие требуемый угол отведения. По логике строения двигательного аппарата пчелы, эта задача решается с помощью так называемых продольных мышц груди. Приведение крылышек происходит пассивно, за счёт упругого сочленения с корпусом, и, при полном расслаблении продольных мышц груди, крылышки сложены вдоль корпуса. Чем сильнее напряжены эти мышцы, тем сильнее сокращена грудь, и тем сильнее отведены крылышки.

Почти мгновенно напрягая продольные мышцы груди, быстро летящая пчела переключает вектор горизонтальной тяги и выполняет весьма эффективное торможение в воздухе. Но главный секрет этих мышц заключается в том, что их неспроста две, по числу крылышек – для независимого друг от друга управления их углами отведения. По логике вышеизложенного, именно

неравные углы отведения правого и левого крылышек обеспечивают пчеле изменения направления горизонтального полёта. Так, если в полёте правое крылышко отведено сильнее, чем левое, то равнодействующая пары реактивных сил, соответственно, повёрнута влево. Если вспомнить, что точка приложения этой равнодействующей вынесена вперёд по отношению к центру тяжести, то становится ясно, что в описанном полётном случае будет происходить левый поворот. Увеличивая угол отведения только правого или только левого крылышка, пчела выполняет свои фантастические левые или правые виражи – да ещё при этом автоматически притормаживает!

Следует добавить, что пчёлы владеют ещё одним воздушным манёвром: боковым перемещением. На первый взгляд, такое перемещение возможно при различии частот вибраций левого и правого крылышек, что давало бы разность между “правой” и “левой” реактивными силами. Но нет: взмахи выполняются всегда синхронно, т.е. с одинаковой частотой – иначе возникла бы разность сил вибрационной тяги от правого и левого крылышек, и появился бы соответствующий опрокидывающий момент сил. А боковое перемещение, на наш взгляд, осуществляется следующим образом. Пчела изгибает брюшко в ту сторону, в которую надо сместиться, и равновесие по крену нарушается. Брюшко перевешивает и накреняет пчелу, так что вектор вибрационной тяги отклоняется вбок. Как и полёт назад, полёт вбок у пчелы совершается лишь с небольшой скоростью, поскольку при этом используется не главный движитель.

В заключение отметим, что некоторые из вышеупомянутых эффектов, сопровождающих тот или иной режим полёта пчелы, заметны невооружённым глазом, без ускоренной видеосъёмки. Так, при быстром полёте пчелы вперёд, её корпус действительно держится горизонтально, а при полёте назад, действительно, голова приподнята, а брюшко провалено. При “раскачивающихся” перемещениях вправо-влево – как при первом вылете из улья – пчела действительно “болтает” брюшком.

Трудно не восхититься тем, как дивно согласованы технические решения в полётном аппарате пчелы, а также тем, как виртуозно этот аппарат используется!

Ссылки.

1. Л.Лозовский. Движители в живой природе. <http://ll-propulsive.narod.ru> Статья “Вибролёт”.
2. Г.Биркгоф. Гидродинамика. “Изд-во иностранной литературы”, М., 1963.
3. Х.Кухлинг. Справочник по физике. “Мир”, М., 1982.
4. А.А.Гришаев, А.А.Гришаев (старший). Секрет машущего полёта птиц. – Доступна на данном сайте.