

УДК 533.6.013:577.31

АЭРОДИНАМИКА РАБОТЫ КРЫЛЬЕВ ПЧЕЛ В РЕЖИМЕ ВЕНТИЛИРОВАНИЯ

А. В. ШЕХОВЦОВ*

М. ЮНГЕ**

В. НАХТИГАЛЬ**

* Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

** Саарлэндский университет, Саарбрукен, Германия

Получено 21.10.99

На основе усовершенствованного метода дискретных вихрей и кинематических данных, полученных в ходе высокоскоростной киносъемки, создана двумерная нелинейная вычислительная модель работы крыльев пчел при вентилировании ими улья. Рассматривались случаи изолированной пчелы, пчелы на посадочной площадке, а также изолированной цепочки пчел. Получены как мгновенные интегральные, так и осредненные динамические характеристики крыла, а также вихревые картины, поля скорости, линии равных скоростей, давлений, мгновенные линии тока. Для расчета мгновенных линий тока были получены аналитические выражения для функции тока от вихря в канале, а также от изолированной цепочки вихрей. Численное моделирование показало, что в каждой маховой полуплоскости формируется циркуляционное течение, выносящее воздух из улья. Сравнительный анализ полученных результатов дал основание для предположения о том, что работа крыльев насекомых в режиме вентиляции, также как и в режиме полета, основана на инерционно-вихревом принципе.

На основі удосконаленого методу дискретних вихорів та кінематичних даних, отриманих за допомогою високошвидкісної кінозйомки, побудована двовимірна нелінійна обчислювальна модель роботи крил бджіл при вентиляванні ними вулика. Розглядалися випадки ізольованої бджоли, бджоли на посадочній площадці та ізольованого ланцюга бджіл. Отримано як миттєві інтегральні, так і осереднені динамічні характеристики крила, а також вихрові картини, поля швидкості, лінії рівних швидкостей, тисків, миттєві лінії течії. Для розрахунку миттєвих ліній течії були отримані аналітичні вирази для функції течії від вихору в каналі та від ізольованого ланцюга вихорів. Чисельне моделювання показало, що у кожній маховій напівплощині формується циркуляційна течія, яка вносить повітря з вулика. Порівняльний аналіз отриманих результатів дав підставу для припущення про те, що робота крил комах в режимі вентиляції, як і в режимі польоту, ґрунтується на інерційно-вихровому принципі.

On the basis of the improved method of discrete vortices and kinematic data obtained during high-speed filmings, two dimensional non-linear computing model of bee's wing flaps at fanning of hive is created. The cases of a single bee, bee on the landing platform, and also single bee chain are considered. Instant integral, mean dynamic characteristics of a wing, as well as vortex patterns, velocity fields, lines of equal velocities, lines of equal pressure coefficients and instant streamlines are obtained. Analytical expressions for streamline function caused by discrete vortex in the channel, and also caused by isolated discrete vortex chain were obtained for calculation of instant streamlines. Numerical modelling has shown, that in every flapping semi-plane the circulation of the flow, which carries out air from a beehive, is formed. The comparative analysis of the obtained results gives a basis for assumption that work of insect wings in ventilation mode, as well as in flight mode, is based on inertial-vortical principle.

В данной работе рассматривается особый режим работы крыльев насекомых, встречающийся у пчел *Apis mellifica carnica*. Данный режим нельзя назвать полетом в его обычном понимании, так как при этом пчелы держатся за посадочную площадку перед ульем. Функция пчел в этом режиме – создание не подъемной силы, а силы тяги. При этом пчелы находятся перед входом в улей, развернувшись к нему головами, и создают циркуляционный поток воздуха, вентилирующий улей. Чаще всего улей вентилирует группа пчел, расположенных в цепочку друг за другом.

Основываясь на кинематических данных, полученных с помощью высокоскоростной кинокамеры, была создана нелинейная математическая модель работы крыльев пчел в режиме вентилирования [1–3]. При построении вычислительной модели использовался усовершенствованный метод дискретных вихрей [4].

Основные предположения относительно свойств среды и крыльев были следующие. Среда предполагалась идеальной, несжимаемой и невесомой, крылья – абсолютно тонкими, недеформируемыми и непроницаемыми. В первый момент времени предполагалось отсутствие вихрей в среде, а также скорости невозмущенного потока на бесконечности. Анализ формы крыльев, а также кинематики их трехмерного вращательно-поступательного движения позволил сделать вывод, что данный режим махов крыльев можно описать при помощи двумерного приближения, не упустив при этом принципиально важных эффектов трехмерности обтекания.

За характерный размер была принята длина максимальной хорды крыла пчелы, расположенной на расстоянии 2/3 длины крыла от его основания, а за характерную скорость – максимальная скорость движения оси вращения крыла в его расчет-

ном сечении. Обезразмеривание частоты махов крыльев пчелы в режиме вентилирования (111 Гц) дало для круговой частоты махов (числа Струхала) величину, равную 0.46.

Имеющиеся экспериментальные данные о траектории движения точки оси вращения крыла пчелы в его расчетном сечении были предварительно отфильтрованы, а для получения значений в промежуточных точках была осуществлена интерполяционная процедура. Преобразованные координаты с поверхности воображаемой сферы радиуса $2/3$ длины крыла проектировались на поверхность воображаемого цилиндра такого же радиуса. Корректность данной процедуры обеспечивается достаточной близостью точек траектории на поверхности сферы к соответствующим точкам на поверхности цилиндра. После этого координаты точек траектории на поверхности цилиндра были пересчитаны в декартовую систему координат, у которой ось абсцисс есть проекция оси абсцисс с поверхности цилиндра. При этом ординатами являются длины дуг на поверхности цилиндра в сечениях, перпендикулярных его оси, с соответствующими знаками. Последняя процедура эквивалентна выпрямлению цилиндрической поверхности в плоскость. При этом длины траектории и годографа вектора скорости движения крыла сохраняются.

Для моделирования движения второго крыла пчелы был применен метод зеркальных отражений. Рассматривались три случая. Первый – случай изолированной пчелы. Второй – случай одной пчелы на посадочной площадке. Третий – случай изолированной цепочки пчел. Учет влияния посадочной площадки совместно с влиянием симметричного крыла осуществлялся посредством расположения крыла в канале с параллельными твердыми непроницаемыми стенками. При этом одна из стенок моделировала влияние второго крыла, а вторая – влияние посадочной площадки. Моделирование махов крыльев пчел, расположенных в цепочку, осуществлялось при помощи выражения для потенциала от бесконечной цепочки вихрей с постоянным шагом.

Получены как мгновенные интегральные, так и осредненные за период махов динамические характеристики крыла, а также характеристики потока вокруг него (вихревые картины, поля скорости, линии равных скоростей и давлений, а также мгновенные линии тока). Для расчета мгновенных линий тока были впервые получены аналитические выражения для функции тока от вихря в канале, а также для изолированной цепочки вихрей. Расчет нестационарного поля давления в области, при-

легающей к крылу, совершающему вращательно-поступательные маховые движения, осуществлялся в соответствии с методикой [5], развитой для случаев расположения крыла в канале, а также для изолированной решетки крыльев.

На рис. 1–3 показаны поля скорости и мгновенные линии тока в конце первого махового цикла в случае изолированной пчелы, в случае одной пчелы на посадочной площадке и в случае изолированной цепочки пчел соответственно. В расчетах ширина канала принималась равной 4, что соответствовало расстоянию между крылом в нижней точке маха и посадочной площадкой, равному 1. Величина шага в решетке крыльев равнялась 3.5.

Из рис. 1 и 2 видно, что по прошествии одного периода в каждой маховой полуплоскости образовалось по два крупномасштабных вихря с противоположными направлениями вращения, которые генерируют циркуляционное течение. Для случаев 1 и 2 не наблюдается качественных различий в характере генерируемого потока. Вместе с тем, видно, что влияние посадочной площадки приводит к появлению более структурированных вихревых образований. В случае, когда пчелы расположены друг за другом в цепочку с шагом 3.5 (см. рис. 3), в конце каждого периода махов вблизи плоскости симметрии наблюдается ряд чередующихся по знаку вихрей, ниже которого сформировался непрерывный поток, выносящий воздух из улья (улей расположен с правой стороны).

На рис. 4 показано поведение коэффициентов нормальной силы (а) и силы тяги (б) на каждом из крыльев за второй и третий периоды махов.

Сравнительный анализ формирующегося вихревого течения вокруг крыльев на протяжении махового цикла и соответствующего поведения мгновенных интегральных характеристик крыльев позволил сделать предположение, что данный режим работы крыльев насекомых, также как и полетные режимы, основан на инерционно-вихревом принципе [6]. В частности (см. рис. 4), первый отрицательный пик нормальной силы (и, соответственно, второй положительный пик силы тяги) должен быть обусловлен силами инерционной природы (нестационарными присоединенными массами воздуха). Второй отрицательный пик нормальной силы (и, соответственно, третий положительный пик силы тяги) связан с развитием динамического срыва потока с правой (передней) кромки крыла, то есть с силами вихревой природы. Первый положительный пик нормальной силы (и, соответственно, отрицательный пик силы тяги), очевидно, обусловлен обоими указанными силами, так как крыло совершает старт от плоскости сим-

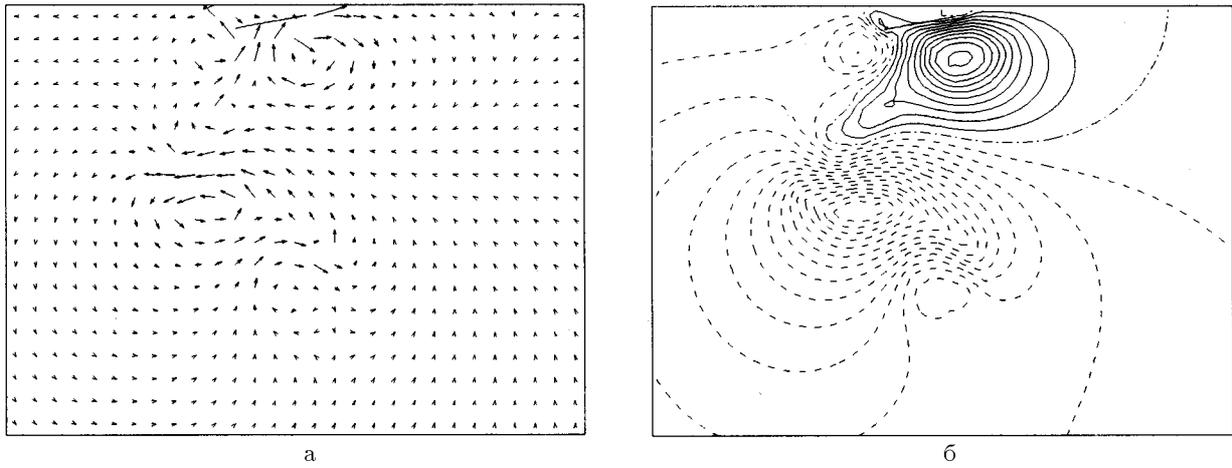


Рис. 1. Поле скорости (а) и линии тока (б) при $\tau = T$ в случае изолированной пчелы

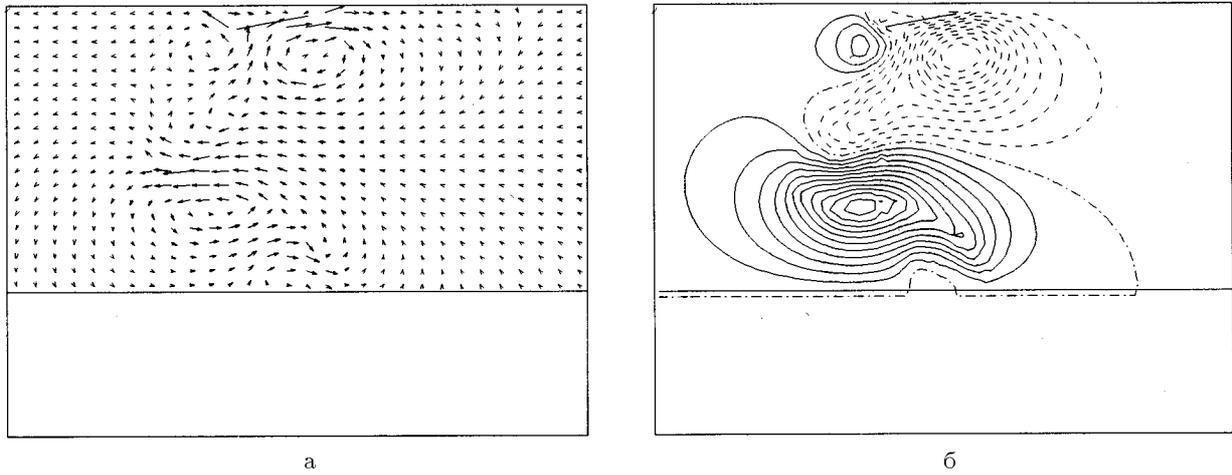


Рис. 2. Поле скорости (а) и линии тока (б) при $\tau = T$ в случае пчелы на площадке

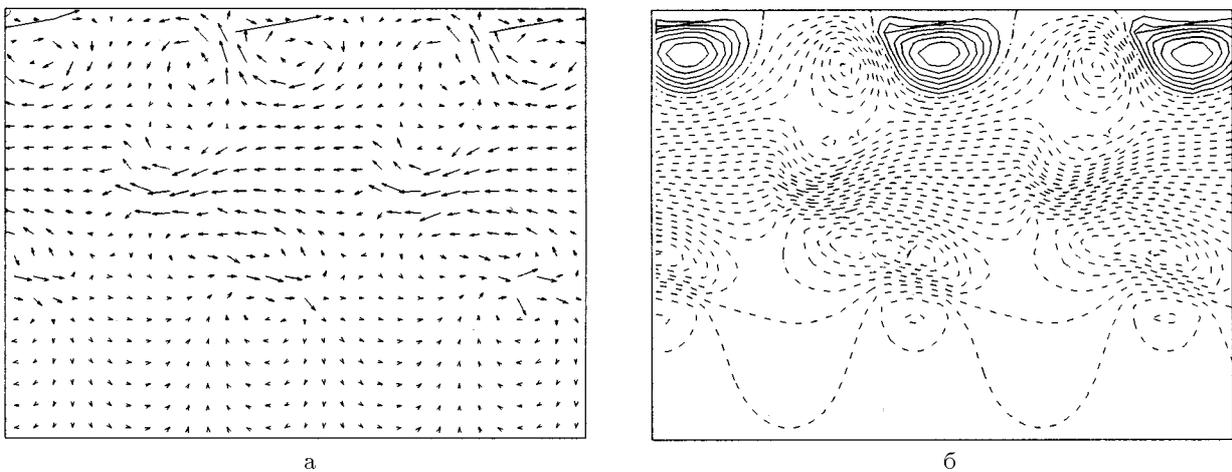


Рис. 3. Поле скорости (а) и линии тока (б) при $\tau = T$ в случае цепочки пчел

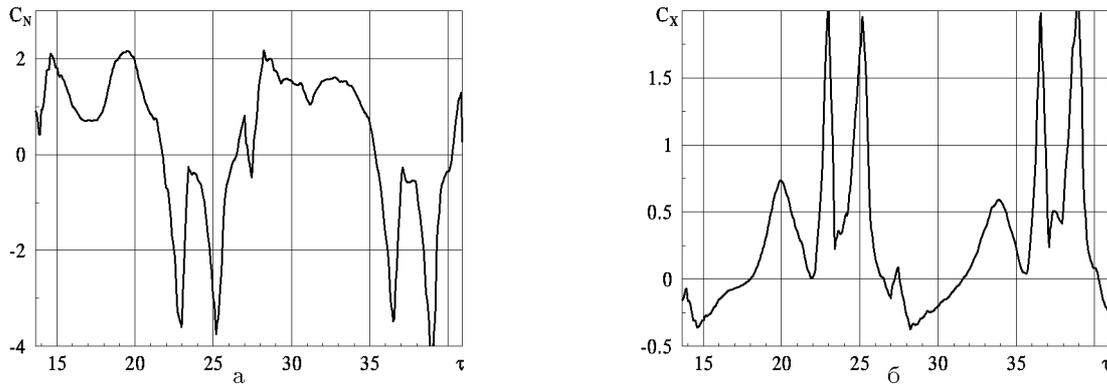


Рис. 4. Поведение коэффициента нормальной силы (а) и коэффициента силы тяги (б) на крыле изолированной пчелы

метрии, при котором на левой (задней) его кромке развивается динамический срыв потока. При этом часть вихревой структуры с нижней стороны крыла засасывается в область между крылом и плоскостью симметрии. Вторым положительный пик нормальной силы (и, соответственно, первый положительный пик силы тяги) должен иметь вихревую природу и обусловлен динамическим срывом потока, но на этот раз с правой кромки крыла.

Высказанные предположения относительно природы возникающих сил будут проверены в ходе дальнейших исследований путем непосредственного выделения каждой из трех компонент, формирующей главный вектор внешних сил на машущем крыле пчелы.

1. Шеховцов А. В. Нелинейная математическая модель работы хвостового плавника дельфина // Прикладная гидромеханика.– 1999.– 1 (73), N2.– P. 71–88.

2. Junge M., Shekhovtsov A., Spillner R., Nachtigall W. Simulation of the Instationary Flow around a Fanning Bee // Zoology.– 1999.– 102, II.– P. 41.
3. Junge M., Shekhovtsov A., Nachtigall W. Application of the Improved Method of Discrete Vortices (IMDV) on the Aerodynamics of Fanning Bees // The Society for Experimental Biology.– Annual Meeting Edinburgh.– 1999.– P. 30.
4. Довгий С. А., Шеховцов А. В. Усовершенствованный метод дискретных вихрей для нестационарных задач // Обчислювальна та прикладна математика.– 1997.– N2(82).– P. 30–44.
5. Шеховцов А. В. Метод расчета нестационарного поля давления в смешанной потенциально-вихревой области, прилегающей к вращающемуся крылу // Информатика, вычислительная и прикладная математика. Теория, приложения, перспективы.– Киев: КУ.– 1998.– С. 259–270.
6. Shekhovtsov A. V. Inertial–vortical principle of animal flight // BIONA–report 12.– Stuttgart, Jena, Lubeck: G. Fischer, Akad. Wiss. u. Lit., Mainz.– 1998.– P. 307–316.