

О НЕКОТОРЫХ НЕТОЧНОСТЯХ В РАЗЪЯСНЕНИЯХ ТЕОРИИ КРЫЛА

Г. Ю. СТЕПАНОВ

(Москва)

В журнале «Природа» к 105-летию С. А. Чаплыгина опубликованы две статьи: И. Н. Веселовского [1] и С. А. Христиановича [2]. Вторая из них посвящена созданию теории крыла и полета. В ней утверждается, что эта теория была создана в 1910 г. работами С. А. Чаплыгина [3], Н. Е. Жуковского [4] и В. Кутта [5]. В качестве предшествующих работ, которые, по словам автора, еще не связывались с теорией полета, упомянуты исследования Б. Робинса (1771 г.), Г. Магнуса (1853 г.), Релея [6] и В. Кутта [7], а также знаменитая работа Н. Е. Жуковского «О присоединенных вихрях» [8]. Самым замечательным результатом работы С. А. Чаплыгина [3] называется «гипотеза Чаплыгина» о сходе потока с острой задней кромки крыла. Основным моментом в создании основ аэродинамики автор считает «понимание того, что при обтекании тел специальной формы (крыльев) может, под действием сил вязкости, устанавливаться циркуляционное течение». Ниже показывается, что это утверждение неверно. Кроме того, отмечается еще несколько существенных недостатков статьи С. А. Христиановича [2], которые имеют принципиальный характер и иногда бытуют в литературе по аэрогидродинамике и в преподавании.

1. Работы Магнуса, Релея [6] и др., которые объясняли появление поперечной силы при полете вращающихся тел, действительно не имеют прямого отношения к теории крыла, в отличие от работ Кутта [7] и Жуковского [8]. В первой из них была правильно вычислена подъемная сила крыла в потоке невязкой жидкости, однако только для дуги окружности, когда скорость обтекания параллельна хорде. В статье Н. Е. Жуковского [8] впервые была получена основная формула для подъемной силы профиля цилиндрического тела, движущегося поступательно с постоянной скоростью, вне зависимости от формы его поперечного сечения. Именно эта формула и эта работа Н. Е. Жуковского всемирно признаны основными для теории крыла и полета. Сам С. А. Чаплыгин говорил, что работа Жуковского [8] «приводит к тому основному соотношению, на которое опирается все современное знание подъемной силы крыла аэроплана». Г. Ламб в своем курсе называет формулу для подъемной силы, со ссылками на работы Кутта, Жуковского и Ланчестера [9], важной теоремой, «содержание которой... составляет основу современной теории подъемной силы крыла аэроплана». Статью Релея [6] Ламб упоминает наряду с работой Гринхилла (1880 г.), исправившим ошибку Релея в вычислении подъемной силы кругового цилиндра, при рассмотрении его плоского движения в жидкости. В первом издании лекций Л. Прандтля говорится, что подъемную силу «можно объяснить, как указал еще Релей, а впоследствии Ланчестер, наличием циркуляционного течения», однако что формула для подъемной силы была выведена только Кутта и независимо Жуковским (при этом Прандтль имел в виду диссертацию Кутта 1902 г., опубликованную в 1910 г. [5]). Из последующих изданий курса Прандтля ссылка на работу Релея [6] была исключена.

2. Гипотеза о плавном сходе потока с острой задней кромки профиля применительно к определению циркуляции скорости вокруг крыла, по свидетельству современников, была высказана С. А. Чаплыгиным в конце 1909 г. при обсуждении на XII съезде русских естествоиспытателей доклада Н. Е. Жуковского «О современном состоянии аэродинамики в связи с воздухоплаванием» и затем применялась ими обоими при разработке теории крыла, винта и решетчат профилей (об этом факте говорится и в статье И. Н. Веселовского [1]). Следует заметить, что эта гипотеза применялась Н. Е. Жуковским как очевидная еще в 1894 г. при изучении движения свободного вихря у острого края пластинки [10]. В связи со всем сказанным условие плавного схода потока в научной литературе принято называть постулатом или условием Жуковского — Чаплыгина (реже Чаплыгина — Жуковского, в зарубежных изданиях — Жуковского или Кутта — Жуковского). Исключение из названия этого условия имени Жуковского в статье [2] нельзя считать обоснованным.

3. Как известно, появление циркуляции скорости вокруг крыла объясняется не действием сил вязкости, как утверждает С. А. Христианович, а физическим условием о невозможности появления больших отрицательных давлений и растягивающих усилий в жидкости (в воздухе), что было бы при непрерывном обтекании искривленной поверхности с большими скоростями и бесконечно больших растягивающих усилий — при обтекании острой кромки крыла без циркуляции несжимаемой жидкостью с любыми скоростями. Указанное физическое условие, не связанное со свой-

ством вязкости, влечет за собой образование в начале движения крыла поверхности разрыва скоростей в жидкости, эквивалентной свободным вихрям, которые диффундируют под влиянием вязкости. Эта же причина обуславливает и возникновение кавитации при движении тел в воде. Условие о плавном сходе потока с острой кромки Н. Е. Жуковский и С. А. Чаплыгин рассматривали как естественное ограничение максимальной скорости идеальной жидкости при безотрывном обтекании крыла (С. А. Чаплыгин дополнительно связывал это ограничение с эффектами сжимаемости газа).

Гипотеза Жуковского – Чаплыгина, предложенная первоначально для равномерного поступательного движения крыла, в последующем была успешно распространена многими авторами (и прежде всего самим С. А. Чаплыгиным) на общий случай неустановившегося движения и деформации профиля. Течения жидкости со сходом с острых кромок свободных вихрей в плоском движении и для крыла конечного размаха хорошо наблюдаются в опытах и были рассчитаны во многих опубликованных работах.

При теоретической постановке задач о неустановившемся обтекании тел (крыла) идеальной жидкостью или газом не обязательно требовать непрерывность поля скоростей. Теория в соответствии с опытом показывает, что обтекание тел с наличием поверхностей разрыва касательных скоростей в жидкости или газе хорошо отвечает действительности, непрерывное же обтекание идеальной жидкостью в общем случае не соответствует наблюдаемому возмущенному движению внешней среды.

Таким образом, появление поверхностей разрыва и кавитации и возникновение циркуляции скорости по контуру крыла обусловлено физическими причинами, не связанными непосредственно с вязкостью, хотя вязкость в типичных случаях, вообще говоря, несущественно деформирует поток и слабо изменяет распределение давлений по крылу. Влияние вязкости не входит в классическую теорию подъемной силы крыла, так же как и в теорию кавитационных обтеканий тел жидкостью, и фактически никак не учитывалось при их создании. В вязкой жидкости обтекание тел, и в частности острой кромки крыла, сопровождается отрывом или стеканием пограничного слоя, который моделируется поверхностью разрыва скорости в идеальной жидкости. Эта поверхность под влиянием вязкости медленно диффундирует в окружающей среде. Образующиеся длинные расширяющиеся вихревые следы (моделируемые поверхностями разрыва скорости) хорошо наблюдаются, например, при полете самолетов в атмосфере.

4. Отметим в качестве примеров еще некоторые очевидные небрежности, допущенные в статье [2].

На стр. 54 сказано: «циркуляционный поток порождает ... систему вихрей». В действительности в теории крыла бесконечного размаха, о которой идет речь, рассматривался исключительно безвихревой циркуляционный поток.

Там же: «При особой форме такого крыла (указанной С. А. Чаплыгиным) возникает подъемная сила при нулевом сопротивлении». Это также неверно, так как в рамках теории плоского безвихревого непрерывного обтекания тела при постоянной скорости сопротивления нет при любой форме тела.

На стр. 55 говорится, что при вращении кругового цилиндра «под действием сил вязкости постепенно возникает вращательное (Г.С.) (циркуляционное) течение, которое накладывается на основное». На самом деле при вращении цилиндра в поступательном потоке вязкой жидкости возникает не циркуляционное (потенциальное) течение, которое «накладывается на основное», а сложное вихревое течение со следом. В таком течении циркуляция скорости зависит от контура интегрирования, и подъемная сила вообще не определяется теоремой Жуковского. Попытки рассчитать эффект Магнуса в рамках модели невязкой жидкости, строго говоря, являются ошибочными и не должны рассматриваться в связи с теорией крыла.

Наконец, без связи с контекстом статьи [2] приведена тепловеская фотография сверхзвукового обтекания самолета, которая, очевидно, не имеет отношения к рассматриваемой в статье классической теории крыла в несжимаемой жидкости. В связи с этой фотографией можно заметить, что теория сверхзвукового обтекания крыла является еще одним замечательным примером использования модели невязкой жидкости, которая позволяет вполне удовлетворительно описать реальный поток. Как известно, скачки успешно моделируются поверхностями разрыва скорости невязкого газа, хотя влияние вязкости имеется; однако это влияние в ряде случаев тоже слабо деформирует поток.

Поступила 27 IX 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Веселовский И. Н. Академик С. А. Чаплыгин. Природа, 1974, № 4, стр. 44–53.
 2. Христианович С. А. С. А. Чаплыгин о подъемной силе крыла. Природа, 1974, № 4, стр. 53–55.
 3. Чаплыгин С. А. О давлении плоскопараллельного потока на преграждающие тела (к теории аэроплана). (1910). Собр. соч., т. 2. М.—Л., Гостехиздат, 1948.
 4. Жуковский Н. Е. О контурах поддерживающих поверхностей аэропланов (1910). Собр. соч., т. 4. М.—Л., Гостехиздат, 1949.
 5. Kutta W. Ueber eine mit den Grundlagen des Flugproblems in Beziehung stehende zweidimensionale Strömung. Sitzungsberichte der Königlichen Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Mathematisch—phisikalische Klasse. Jahrgang 1910. 2. Abhandlung, München, 1910.
 6. Rayleigh. On the irregular flight of a tennis-ball. Messenger of Mathematics, vol. 7, London, 1877.
 7. Kutta W. Auftriebskräfte in strömenden Flüssigkeiten, Illüstrierte Aeronautische Mitteilungen, H. 3, Strassburg, 1902.
 8. Жуковский Н. Е. О присоединенных вихрях. (1906). Собр. соч., т. 4. М.—Л., Гостехиздат, 1949.
 9. Lanchester F. W. Aerodynamics, London, 1907.
 10. Жуковский Н. Е. К вопросу о разрезании вихревых шнуров (1894). Собр. соч., т. 2. М.—Л., Гостехиздат, 1949.
-