

**О КОММЕНТАРИЯХ К ИЗБРАННЫМ ТРУДАМ С. А. ЧАПЛЫГИНА**

В серии «Классики науки» вышли избранные труды С. А. Чаплыгина [1], включающие шестнадцать его основных сочинений по механике жидкости и газа, математике и общей механике. В книге публикуется биографическая хроника и перечень печатных работ С. А. Чаплыгина.

Издание содержит биографический очерк, написанный М. В. Келдышем, и комментарии к работам С. А. Чаплыгина по гидроаэродинамике, по интегрированию дифференциальных уравнений и по теории неавтономных систем.

Комментарии к трудам С. А. Чаплыгина по математике и общей механике удовлетворяют своему назначению.

Однако содержание комментариев С. А. Христиановича к работам С. А. Чаплыгина по аэродинамике [1] вызывает ряд существенных замечаний. Они не содержат основного — оценки наследия С. А. Чаплыгина с современных позиций (см., например, [2, 3]). В то же время в них имеются недостатки научного и исторического характера, недопустимые в современной научной литературе и тем более при переиздании Академией наук СССР трудов С. А. Чаплыгина в серии «Классики науки».

Главный недостаток заключается в некритическом повторении неправильного рассуждения о механической природе подъемной силы в созданной Н. Е. Жуковским и С. А. Чаплыгиным классической теории крылового профиля в рамках постановки задач о непрерывном обтекании его идеальной (невязкой) несжимаемой жидкостью. Соответствующее высказывание по этому поводу С. А. Христиановича ([1], стр. 440) требует подробного разбора:

«Из уравнений Л. Эйлера следовало, что при установившемся обтекании тела безграничным потоком идеальной жидкости, при отсутствии в потоке вихрей и поверхностей разрыва равнодействующая сил давления, приложенных к его поверхности, равна нулю (парадокс Эйлера — Даламбера). Из этих уравнений также следовало, что вихри в однородной жидкости, лишенной вязкости, в поле потенциальных сил не могут возникнуть. Таким образом, значение сил, действующих на тело, при обтекании его установившимся безграничным потоком жидкости в конечном счете определяется возникновением поверхностей скольжения и действием в жидкости» (разрядка автора замечаний).

Прежде всего, только из уравнений Эйлера не следует ни парадокс Эйлера — Даламбера, ни теорема Лагранжа о сохранении вихрей. Для справедливости этих предложений, как известно, кроме уравнений Эйлера необходимо опереться еще на существенные дополнительные условия. Такими условиями, в частности, являются конечные размеры тела (например, неплоская задача), и, что очень существенно, баротропность процессов в жидкости.

Далее, следует особенно подчеркнуть, что существуют такие решения уравнений Эйлера, в которых упомянутые допущения не удовлетворяются, и которые как раз необходимы и приняты в аэродинамике для описания реальных явлений. Весь последующий прогресс в аэродинамике был связан именно с построением обтеканий тел идеальной жидкостью или газом при наличии поверхностей разрыва скоростей или распределенных вихрей.

Вихри в идеальной жидкости могут возникать при отсутствии баротропии (например, если есть поток тепла) и на границах потока. Так, например, в случае отрывного обтекания тела, со сходом струй и с «застойной» зоной за телом, в поток с поверхности тела непрерывно стекают свободные вихри, совпадающие с границами струй. Аналогичный процесс происходит и при неустановившемся обтекании профиля крыла: на его острой кромке, вообще говоря, непрерывно образуются вихри, уходящие в поток. Интенсивность этих вихрей в каждый момент времени такова, чтобы выполнялось физически очень ясное и независимое от свойств вязкости условие о конечности давления или о конечности скорости жидкости на острой кромке (гипотеза Жуковского — Чаплыгина).

Правильное объяснение образования и роли свободных поверхностей разрыва в идеальной жидкости было дано еще Г. Гельмгольцем в работе 1868 г., изданной в русском переводе под редакцией и с примечаниями С. А. Чаплыгина [1]. Исклю-

<sup>1</sup> Важный факт, ускользнувший от комментатора работ С. А. Чаплыгина.

чительно ясное и содержательное высказывание Гельмгольца заслуживает цитирования. Отметив, что в вязкой жидкости ничто не мешает скольжению слоев, Гельмголец пишет (см. [4], стр. 56): «Если бы капельные жидкости текли непрерывно, как электричество, то скорость у каждого острого края, огибаемого потоком, имела бы бесконечно большую величину. Отсюда следует, что всякий острый край, около которого протекает жидкость, даже при самой незначительной скорости остальной массы жидкости, должен произвести в ней разрыв и образовать поверхность раздела» (курсив Гельмгольца), и ниже: «поверхность раздела можно математически трактовать совершенно так, как если бы она была вихревой поверхностью». Аналогичное объяснение образованию поверхностей разрыва и циркуляции скорости вокруг профиля, а также вихревой пелены за крылом конечного размаха дает Л. Прандтль [5]. Под его непосредственным влиянием в начале 20-х годов В. Бирнбаумом и Г. Вагнером были выполнены первые расчеты нестационарного движения тонких профилей с образованием свободных вихрей в идеальной жидкости. Одновременно Прандтль указывает на изменения, вызываемые малой вязкостью жидкости, приводит качественное описание образования тонких вихревых слоев в вязкой жидкости, заменяющих поверхности разрыва в идеальной жидкости, и обсуждает предельные переходы от более общей модели течения маловязкой жидкости с пограничным слоем и следом к разрывным и вихревым течениям идеальной жидкости, определяемым независимо от свойства вязкости. Поскольку речь идет о моделировании реальных явлений в рамках невязких жидкостей и газов, для получения схем обтеканий необходимо всегда опираться на дополнительные разумные физические условия и условия, апробированные в опытах. Предельные переходы от вязких потоков к невязким всегда связаны с рядом существеннейших гипотез<sup>1</sup>, которые на практике не требуются, так как в известных случаях моделирование в рамках идеальной жидкости уже дает хорошие результаты. Никакие соображения, прямо или косвенно связанные с вязкостью, не являются, строго говоря, доказательными, и по существу они не нужны для разъяснения природы подъемной силы и других важных фактов классической теории крыла.

В тех же случаях, когда влияние вязкости существенно, модель идеальной жидкости непосредственно непригодна. Рассматривая вопрос о возникновении подъемной силы на вращающемся круговом цилиндре (эффект Магнуса), С. А. Христианович пишет так: «...при вращении цилиндра... под действием сил вязкости возникает вращательное (циркуляционное) течение, которое накладывается на основное. С той стороны, где скорости при сложении увеличиваются, — давление на поверхности цилиндра уменьшается (в соответствии с теоремой Бернулли)...». Очевидно, что в действительности в вязкой жидкости рассматриваемое течение не является простым «наложением» потенциальных циркуляционного и основного течений и что к нему, строго говоря, нельзя применять ни интеграл Бернулли, ни теорему Жуковского.

В опытах с вращающимся цилиндром возникает сложное отрывное вихревое течение со следом, к которому теория потенциальных течений совершенно неприменима. Упомянув ниже справедливые сомнения Релея по этому вопросу, С. А. Христианович тут же утверждает, что при больших числах Рейнольдса «даже для такого тела, как цилиндр» силы давления на тело «с хорошим приближением могут быть вычислены с помощью уравнений Эйлера» (по тексту комментария имеется в виду круговой цилиндр и теория безотрывного потенциального потока). На начальном этапе зарождения аэродинамики многие авторы (в их числе Н. Е. Жуковский [6] и Л. Прандтль [5]) действительно рассматривали эффект Магнуса в связи с возникновением подъемной силы при наличии циркуляции скорости, подчеркивая, однако, сугубо приближенный и качественный характер этого рассмотрения. С современной точки зрения вращающиеся цилиндры А. Флеттнера (1924 г.) не должны привлекаться и не привлекаются для объяснения аэродинамической природы подъемной силы крыльев самолетов.

С. А. Христианович неправильно называет и неполно формулирует гипотезу о конечной скорости при сходе потока невязкой жидкости с острой кромки обтекаемого тела. Эта гипотеза в явной форме по предложению С. А. Чаплыгина с 1910 г. используется для определения циркуляции скорости вокруг профиля крыла, имеющего острую заднюю кромку, однако в отчетливом виде это условие как гипотеза, связанная с постановкой и решением одной гидродинамической задачи, применялась Н. Е. Жуковским еще в 1894 г. [7]. Однако эта задача не была связана непосредственно с теорией крыла. Затем в период 1906–1900 гг. Н. Е. Жуковский неоднократно изображает и обсуждает течения около крылообразных контуров со сходом потока с выходной кромки (см. [6], фиг. 1; [8], фиг. 4). Такие течения строи-

<sup>1</sup> Например, допущений асимптотически стационарного ламинарного слоя и следа, что в действительности при больших значениях числа Рейнольдса не реализуется.

лись также В. Кутта (1902 г.) в частном примере о плоскопараллельном обтекании крылового профиля в виде дуги круга. В связи с указанными фактами эту гипотезу обычно называют гипотезой или постулатом Жуковского — Чаплыгина (реже Чаплыгина — Жуковского, Жуковского или Кутта — Жуковского). С. А. Христианович без всяких оснований, вопреки очевидности, устраняет из названия этой гипотезы имя Н. Е. Жуковского и приводит ее в следующей формулировке: «...если профиль имеет скругленную переднюю и острую заднюю кромку, то при его равномерном движении устанавливается циркуляционное течение с непрерывно сходящим потоком у острой кромки».

В комментарии такая формулировка недостаточна по следующим причинам.

1. Потеря значительно более общий смысл гипотезы Жуковского — Чаплыгина, которая в действительности верна и применяется не только в теории плоского профиля, но и при пространственном обтекании крыла конечного размаха.

2. Нет необходимости рассматривать только профили со скругленной передней кромкой. Еще Н. Е. Жуковский и С. А. Чаплыгин рассматривали «нерасчетное» обтекание пластинки и дужки с бесконечной скоростью (и подсосывающей силой) на передней кромке.

3. Не следует также ограничивать гипотезу «равномерным движением» (в действительности принят более правильный термин — установившееся движение) профиля и непрерывным потоком жидкости. Основное значение гипотезы Жуковского — Чаплыгина проявляется именно при неустановившихся движениях, когда с острой кромки или кромок в поток сходят вихревые поверхности разрыва, чем и объясняется, в рамках классических моделей идеальной жидкости или газов, возникновение циркуляции скорости вокруг профиля. Это чрезвычайно важное значение в теории крыла гипотезы Н. Е. Жуковского и С. А. Чаплыгина в комментариях также упущено.

4. Говоря о циркуляционном обтекании профиля со сходом потока у острой задней кромки (и ниже о пропорциональности подъемной силы углу атаки или синусу этого угла), следовало указать, что рассматриваются достаточно малые углы атаки, причем используется специальное определение угла атаки, которым редко пользуются на практике.

Специально приходится остановиться на недопустимом противопоставлении в комментариях знаменитой работы Н. Е. Жуковского 1906 г. («О присоединенных вихрях») и работы Релея 1877 г., в которой, по словам С. А. Христиановича, «была впервые установлена доказанная позже общая теорема Н. Е. Жуковского». В действительности в упомянутой работе Релея была вычислена (с арифметической ошибкой) величина подъемной силы в очень специальном случае потенциального циркуляционного обтекания несжимаемой жидкостью кругового цилиндра. Эта сила была определена путем интегрирования сил давления по поверхности цилиндра. В последующем работа Релея цитировалась только в связи с обтеканием кругового цилиндра. Расчет Релея, что уже указывалось, явно не соответствовал действительности как в случае неподвижного, так и в случае вращающегося цилиндра. Характерно, что ни сам Релей, и никто из многочисленных авторов, цитировавших его работу, никогда не утверждали приоритет Релея в открытии основной закономерности для подъемной силы произвольной системы профилей любой формы. Тем более странно, что это впервые делает С. А. Христианович.

Пренебрежительное отношение С. А. Христиановича к вопросам научного приоритета Н. Е. Жуковского и С. А. Чаплыгина проявляется и в других местах комментариев.

Отдельный комментарий в 12 строк посвящен совместной работе Н. Е. Жуковского и С. А. Чаплыгина, касающейся расчета подшипника. С. А. Христианович почему-то не подчеркивает то основное и новое, что отличает эту работу от предшествующих — произвольную величину зазора в подшипнике.

В комментариях не сообщается фактов открытия С. А. Чаплыгиным разрезного крыла и теоретического обоснования им механизированных крыльев, а также не получил надлежащего освещения выдающийся вклад С. А. Чаплыгина, совместно с Н. Е. Жуковским, в гидродинамическую теорию решеток турбомашин (см. [3, 9]). Про бесспорно новые результаты С. А. Чаплыгина в этой области в комментариях написано, что они «были независимо получены и другими авторами в разных странах».

В то же время С. А. Христианович неправильно утверждает, что Н. Е. Жуковский разработал теорию индуктивного сопротивления для лопасти винта.

С. А. Христианович пишет, в связи с работами С. А. Чаплыгина, о задаче отыскания «оптимальной формы хорошо обтекаемых тел и прежде всего крыльев». Это действительно важная проблема, однако С. А. Чаплыгин и Н. Е. Жуковский ею не занимались, так как эту задачу нельзя разрешить только в рамках развитой ими теории плоских потенциальных течений идеальной несжимаемой жидкости.

О теории сопротивления по Ньютону в комментарии сказано, что «с ее помощью нельзя определить силы, действующие на тело при обтекании его потоком жидко-

сти или газа». Вообще говоря, это не так. Кроме указанного в сноске на стр. 440 случая гиперзвуковых скоростей, формула Ньютона оказалась справедливой в свободно-молекулярном потоке и в некоторых других случаях.

Комментарии к работе «О газовых струях» не дают отчетливого представления об этой работе и содержат ряд неточностей. Так, не отмечено, что С. А. Чаплыгин рассматривал только адиабатические безвихревые течения совершенного газа. Ряды Чаплыгина, в отличие от сказанного в комментариях, отнюдь не представляют собой «весьма общее решение уравнений Эйлера», и эти ряды в действительности непосредственно не продолжаются за звуковую линию. Нет конкретных ссылок на последующие работы, в которых применялись и развивались точный и приближенный методы С. А. Чаплыгина.

Все изложенное выше свидетельствует о больших недостатках как самих комментариев, так и их рецензирования. Наличие этих недостатков тем более непристительно, что некоторые из них уже отмечались в печати [10] и были хорошо известны рецензентам в связи с обсуждением предшествующей статьи [11], по существу повторенной в комментариях.

Публикация рассмотренных комментариев бесспорно снижает качество в остальном весьма полезного академического издания [1]. Их появление должно быть признано серьезным упущением редакционной коллегии серии «Классики науки», которая была своевременно уведомлена о возможности появления таких низкокачественных комментариев.

Г. Ю. Степанов

Поступила 23 VII 1976

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чаплыгин С. А. Избранные труды. М., «Наука», 1976.
2. Келдыш М. В., Седов Л. И. Приложения теории функций комплексного переменного к гидродинамике и аэродинамике. М., «Наука», 1964.
3. Механика в СССР за 50 лет, т. 2. М., «Наука», 1970.
4. Гельмгольц Г. Два исследования по гидродинамике. М., «Палас», 1902.
5. Прандтль Л., Титгенс О. Гидро- и аэромеханика. Т. 1, 2. М.-Л., Гостехиздат, 1933, 1935.
6. Жуковский Н. Е. О падении в воздухе легких продолговатых тел, вращающихся около своей продольной оси (1906). Собр. соч., т. 4. М.-Л., Гостехиздат, 1949.
7. Жуковский Н. Е. К вопросу о разрезании вихревых шнуров (1894). Собр. соч., т. 2. М.-Л., Гостехиздат, 1949.
8. Жуковский Н. Е. О подсазывающем действии потока воздуха на пластинку (1909). Собр. соч., т. 2. М.-Л., Гостехиздат, 1949.
9. Степанов Г. Ю. Теория гидродинамических решеток в работах Н. Е. Жуковского и С. А. Чаплыгина и ее последующее развитие. Изв. АН СССР, МЖГ, 1972, № 2.
10. Степанов Г. Ю. О некоторых неточностях в разъяснениях теории крыла. Изв. АН СССР, МЖГ, 1975, № 3; РЖМехан., 1975, № 12Б307.
11. Христианович С. А. С. А. Чаплыгин о подъемной силе крыла. Природа, 1974, № 4.

Редколлегия с сожалением отмечает, что в комментариях к собранию сочинений С. А. Чаплыгина («Наука», 1976) содержатся неправильные трактовки ряда вопросов аэродинамики и ее истории, на которые наш журнал уже обращал внимание в № 3 за 1975 г. В связи с этим Редколлегия сочла целесообразным публикацию критических замечаний Г. Ю. Степанова по этому поводу.

Обсуждаемые в этих замечаниях вопросы назрели, так как во многих научных статьях, учебниках и даже некоторых работах классиков, заложивших основы теории крыла, встречаются нечеткие формулировки и выводы, аналогичные критикуемым выше. Однако, в настоящее время достигнута достаточная ясность в понимании сущности обсуждаемых вопросов, и четкая формулировка соответствующих выводов поможет читателю правильно ориентироваться в ставших уже классическими вопросах аэродинамики, а также поможет совершенствованию методов образования в области аэродинамики.

Редколлегия