



НИКОЛАЙ ЕГОРОВИЧ ЖУКОВСКИЙ

К столетию со дня рождения

(5(17) января 1847 г. – 17 марта 1921 г.)

Он своей светлой и могучей личностью объединял в себе и высшие математические знания и инженерные науки. Он был лучшим соединением науки и техники, он был почти университетом. Не отвлекаясь ничем проходящим, лишь в меру неизбежной потребности отдавая дань потребностям жизни, он все свои гигантские силы посвящал научной работе. Его цельная натура была беззаветно посвящена этому труду. Вот чем объясняется то огромное по богатству наследие, которое к нам от него переходит.

С.А. Чаплыгин, 21 марта 1921 г.

Наследие Н.Е. Жуковского действительно огромно. Это не только его опубликованные труды и курсы его лекций, это и работы его школы, его учеников и последователей, это – созданные им Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ) и Военно-воздушная академия (ВВА), а потом организованные на основе винтомоторного отдела ЦАГИ Центральный авиамоторный институт (ныне ЦИАМ) и, из аэромеханического факультета Московского высшего технического училища, Московский авиационный институт.

Труды Жуковского представлены Полным собранием сочинений (1935–1939) в девяти томах и семи выпусках лекций. Жизни и деятельности Жуковского посвящены

биографии, написанные его племянницей Е.А. Домбровской (1939), учеником и близким сотрудником Л.С. Лейбензоном при участии Н.М. Семеновой (1947), книги А.А. Космодемьянского (1969, 1984) и М.С. Арлазорова (1959, 1964), а также более 50-ти юбилейных и тематических статей в различных изданиях, в их числе несколько статей В.В. Голубева, статьи Б.С. Стечкина, Б.Н. Юрьева, И.И. Артоболевского, С.А. Христиановича, Б.Н. Делоне, В.П. Ветчинкина и др. Научные результаты Жуковского отражают труды различных конференций и историко-научные сборники, в частности: "Развитие механики в СССР" (1967), "Механика в СССР за 50 лет" (Т. 1, 1968 и Т. 2, 1970), "История механики с конца XVIII века до середины XX века" (1972).

В 1947 г. правительство и научно-техническая общественность нашей страны широко отметили 100-летие со дня рождения Н.Е. Жуковского. Академия наук, ученые и научно-технические советы многих организаций провели юбилейные заседания, ведущие журналы посвятили ему специальные статьи. Наш журнал опубликовал краткую биографию Жуковского, список 178 его печатных трудов и их обзор (ПММ, 1947. Т. 11. Вып. 1. С. 3–40). В том же году было начато юбилейное издание Избранных сочинений Жуковского (1948) в двух томах и Собрания сочинений (1948–1950) в семи томах; в седьмой том вошли 12 восстановленных по рукописям работ и 6 отзывов Жуковского, а также список 338 сохранившихся названий сделанных им докладов. К сожалению, остался неизданным Справочный (10-й) том Полного собрания сочинений, подготовленный А.П. Котельниковым в 1941–1943 гг., который должен был содержать именную указатель и резюме всех работ Жуковского.

Научно-педагогическая деятельность Жуковского неразрывно связана с Императорским техническим училищем (ТУ) и Московским университетом (МУ), в которых он непрерывно работал до конца своих дней.

Жуковский окончил МУ в 1868 г. Мечтая с детства о практической инженерной деятельности, он в том же году поступил на 2-й курс Института путей сообщения в Петербурге. Трудности учебы, материальная необеспеченность и, наконец, несдача экзамена по геодезии, вынудили Жуковского отказаться от учебы в этом институте. Он возвратился в Москву и весной 1871 г. сдал магистерские экзамены по математике и механике в МУ, что позволило ему получить место преподавателя в ТУ. После защиты в 1879 г. магистерской диссертации Жуковский возглавил кафедру механики в ТУ. В 1882 г. Жуковский защитил в МУ докторскую диссертацию, через три года он стал там приват-доцентом кафедры механики, а в 1886 г. принял кафедру от Ф.А. Слудского.

Механика в XIX в. развивалась в основном как аналитическая в русле школ Лагранжа и Коши в направлении получения и совершенствования общетеоретических результатов, почти не связанных с решением частных задач и с техническими приложениями. В России проводником этих школ был ученик Коши М.В. Остроградский. В университетских курсах механику рассматривали как прикладную математику, и только П.Л. Чебышев в Петербурге и Н.Е. Жуковский в Москве обратились в своих научных исследованиях и в преподавании к решению конкретных реальных задач.

Следуя Пуансо в общей механике и Гельмгольцу в гидродинамике, Жуковский широко использовал и развивал свойственные ему наглядные геометрические представления и моделирование как плодотворный метод исследования и обучения. Моделирование Жуковский осуществлял не только на лабораторных приборах, но и на аналоговых физических и на мысленных моделях, а также при математической постановке рассматриваемых им задач. Жуковский с большим искусством упрощал схему явления до возможности получения простых и наглядных результатов. Его редко интересовали общетеоретические проблемы; решаемые им задачи, как правило, вполне конкретны, они заимствованы из наблюдений или опытов, а их решения доведены до числовых примеров, экспериментальной проверки и технических приложений.

Труды Н.Е. Жуковского охватывают почти всю современную ему теоретическую и прикладную механику. Его Полное собрание сочинений содержит 189 работ с отдельными названиями, напечатанных вместе с редакционными дополнениями на 6400 с. Из них половина работ относится к общей (теоретической) и прикладной механике, четверть – к общей и прикладной гидромеханике и четверть – к авиации.

Общая и прикладная механика. Самая известная работа Жуковского в общей механике – его докторская диссертация "О прочности движения" (1882). Ссылаясь на первую попытку установить общую теорию "прочности" (устойчивости) движения Томсоном и Тэтом в их "Натуральной философии" (1867) и упоминая неизвестную ему в начале исследования работу Рауса (1877), Жуковский развил свою линейную теорию устойчивости траекторий консервативных динамических систем, называемую ныне орбитальной устойчивостью. Жуковский записывает уравнения возмущенного движения на основе принципа наименьшего действия в форме Якоби, сохраняет в этих уравнениях члены только первого порядка малости, указывает условие устойчивости в геометрической форме, вводит "меру прочности движения" и прикладывает свою теорию к решению нескольких задач, в частности, к задачам о движении тяжелого волчка Лагранжа и трех материальных точек в случаях Лапласа при произвольном степенном законе сил их взаимодействия. Однако заслуга создания основ современной теории устойчивости движения в строгом виде принадлежит А.М. Ляпунову, защитившему в 1892 г. в МУ свою знаменитую докторскую диссертацию "Общая задача об устойчивости движения". Одним из оппонентов по его диссертации был Жуковский. Позже, в лекциях "Теория регулирования хода машин" (1906–1909) Жуковский дал подробное изложение основ устройства и теории всех известных к тому времени регуляторов паровых и гидравлических машин, учел влияние кулонова трения, изучил разностные уравнения теории регулирования (для машин с отсечкой пара). В этих лекциях Жуковский упоминает фундаментальную работу И.А. Вышнеградского (1876), однако лишь в полемическом плане, отражавшем возникшую в конце века дискуссию о законности линеаризации Вышнеградским сил трения.

Работа Жуковского "Геометрическая интерпретация рассмотренного С.В. Ковалевской случая движения тяжелого тела около неподвижной точки" (1896) относится к числу красивейших результатов аналитической механики. В этой работе Жуковский дал геометрическую трактовку интегралов, определяющих движение тела, ввел соответствующие ортогональные системы координат и указал механизм, кинематически осуществляющий движение тела в случае Ковалевской. Тем самым Жуковский завершил начатый Пуансо геометрический анализ всех возможных случаев движения тела с неподвижной точкой, допускающих общие интегралы движения в эллиптических функциях.

Общение с профессором МУ и директором Московской обсерватории Ф.А. Бредихиным натолкнуло Жуковского на решение нескольких астрономических задач (1881–1886) и, возможно, на выдающееся исследование движения твердого тела, имеющего полости, наполненные однородной несжимаемой жидкостью (1885). В этой работе, обобщая частные результаты Стокса, Гельмгольца и Неймана, Жуковский дал полное исследование этого вопроса с определением внутренних присоединенных масс и, в случаях многосвязных полостей, внутренних моментов количества движения, рассмотрел примеры полостей разной формы, изучил влияние вязкости жидкости, наполняющей полости.

Большое число работ Жуковского относится к прикладной механике. Это задачи о скольжении ремня на шкивах, об упругой оси турбины и осях с качающимися подшипниками, о распределении давления по нарезкам винта, динамике поезда и автомобиля и др.

Интересна и оригинальна работа Н.Е. Жуковского, посвященная условиям рав-

новесия тела при наличии сил сухого трения, где впервые исследованы особенности потери равновесия под действием сил трения, подчиняющихся закону Кулона.

Надо специально отметить важные работы Жуковского, относящиеся к теории механизмов и машин. В 1883 г. он дополняет чисто аналитические работы П.Л. Чебышева о построении плоского четырехзвенного механизма, движение одной из точек которого наименее отклоняется от прямой, наглядным кинематическим решением, основанном на требовании, чтобы эта точка совпала с центром ускорений высокого порядка; в 1909 г. он предлагает "рычаг Жуковского", позволяющий свести задачу определения движения любого механизма с одной степенью свободы к задаче о равновесии его плана скоростей как жесткой стержневой системы. Эти работы Жуковского были продолжены его учениками А.В. Ассуром и Н.И. Мерцаловым, И.И. Артоболевским и др.

Курсы лекций Н.Е. Жуковского по механике, выдержавшие несколько изданий, до середины уходящего века были основными для большинства преподавателей теоретической механики и инженеров нашей страны. В качестве преподавателя ТУ Жуковский выработал ставшее классическим изложение механики в простой, ясной и одновременно строгой форме, с многочисленными иллюстрациями, примерами и упражнениями. В МУ Жуковский стал преподавать в возрасте 38 лет, будучи уже профессором с 15-летним стажем в ТУ и со сложившимися взглядами на методы исследования в механике и методику ее преподавания. Приступив к преподаванию в университете, Жуковский полностью перестроил его на основе своего опыта. На втором курсе он читал Введение в механику (кинематику и геометрическую статику) и динамику материальной точки, на третьем – аналитическую статику, динамику системы и теорию притяжения. На четвертом курсе в первом полугодии были лекции по гидростатике и началам гидродинамики, во втором – спецкурсы по аналитической механике и по динамике неизменяемого тела. Когда к Жуковскому перешло заведование механическим кабинетом, он сделал его лабораторией, постепенно превратившейся в аэродинамическую.

Курсы механики Жуковского написаны в координатном изложении, хотя он всегда изображает векторы сил, момента пары, скоростей и ускорений и использует операцию векторного суммирования. Динамику точки Жуковский основывает на трех законах: законе инерции Галилея, законе независимости сил от движения и независимости их действия, законе равенства действия и противодействия. Следуя авторам французских учебников, силы инерции Жуковский называет "фиктивными", что, однако, не мешает ему считать, что они в задачах динамики "ничем не отличаются от реальных сил" и, соответственно, что согласно теореме Д'Аламбера (формулируемой кинетостатически) "силы движения вместе с силами инерции уравнивают сопротивление связей системы". И в настоящее время заслуживают внимания преподавателей теоретической механики и авторов учебников входящие в курсы Жуковского задачи движения снаряда при квадратичной силе сопротивления, изохронного (циклоидального) маятника, работы регуляторов хода машин, цепной линии и нити постоянной прочности, а также изложение принципов Лагранжа и Гамильтона, геометрической интерпретации свободного движения тела и движения в случае Ковалевской, теории потенциала притяжения эллипсоида и эллипсоидальной оболочки.

Общая и прикладная гидромеханика. Развитие гидродинамики в XIX в., в отличие от механики деформируемого твердого тела, было почти не связано с техническими приложениями. Оставался открытым главный вопрос: о происхождении сил взаимодействия жидкости и тела. Парадокс Эйлера – Д'Аламбера об отсутствии этих сил при установившемся движении тел в идеальной жидкости ставил под сомнение практический смысл этой ее модели, и теоретические работы, равно как и учебные курсы, имели вид математических упражнений. Уравнения движения вязкой жидкости, за исключением очень частных случаев, интегрированию не поддавались, а струйная теория Гельмгольца, хотя и дала некоторое разрешение парадокса Эйлера –

Д'Аламбера, оказалась несостоятельной для вычисления реальных сил и создала новый парадокс бесконечности кинетической энергии следа за телом, движущимся в жидкости.

Главным научным результатом Жуковского явилась открытая им теорема о связи подъемной силы с циркуляцией скорости. Окончательно разрешив парадокс Эйлера – Д'Аламбера, эта теорема ознаменовала подлинный переворот в развитии гидродинамики и поставила имя Жуковского в один ряд с именами ее основоположников.

К гидродинамике относится первый печатный труд Жуковского – его магистерская диссертация "Кинематика жидкого тела" (1876). За пять лет интенсивной работы Жуковский ознакомился с современным ему состоянием вопроса и особенно с сочинениями Томсона и Тэта, Гельмгольца, Бертрана, Кирхгофа. В диссертации Жуковский создал "наглядный очерк теории скоростей непрерывно изменяемого тела", в общем случае пространственного вихревого движения сжимаемой жидкости, пользуясь геометрическими представлениями и естественными координатами. Он описал движение в бесконечно-малой частице, рассмотрел линии тока, дал классификацию особых точек, определил, следуя Томсону, циркуляцию скорости, привел уравнения отсутствия вихрей и неразрывности в естественных координатах с использованием кривизны линий тока и ортогоналей к ним.

Затем Жуковский публикует еще три работы по гидродинамике (1876, 1884, 1885), две из которых, одновременно относящихся к общей механике, уже были упомянуты, и, наконец, замечательные "Лекции по гидродинамике", написанные и прочитанные Жуковским в 1886 г. в МУ. Эти лекции представляют собой весьма полный ко времени издания курс гидродинамики. В нем после изложения кинематики Жуковский выводит уравнения движения жидкости, рассматривает электрогидродинамическую аналогию, вводит комплексные переменные, использует эллиптические координаты и приводит примеры движений с постоянной завихренностью.

В 1890 г. Жуковский публикует фундаментальное исследование "Видоизменение метода Кирхгофа для определения движения жидкости в двух измерениях при постоянной скорости, данной на неизвестной линии тока". В отличие от Кирхгофа (1869), Жуковский использует не комплексную скорость течения, а ее логарифм, функцию Жуковского, и рассматривает ее и комплексный потенциал как аналитические функции вспомогательного переменного, изменяющегося в верхней полуплоскости. Жуковский решил своим методом 18 задач, из них 10 впервые. Особенно важны построенные Жуковским струйные течения с конечными длинами свободных границ. Одно из этих течений в 1955 г. одновременно и независимо было использовано Рошко и Эпплером в качестве одной расчетной схемы отрывных и кавитационных течений ("схема Жуковского – Рошко – Эпплера"). Кроме того, Жуковский дал первое решение задачи теории гидродинамических решеток – задачи струйного обтекания решетки пластин при входе потока по нормали к фронту решетки (полное решение этой задачи было опубликовано С.А. Чаплыгиным и А.П. Минаковым в 1930 г.).

В следующей статье "Определение движения жидкости при каком-либо условии, данном на линии тока" (1891) Жуковский впервые поставил и точно решил две задачи течения тяжелой и капиллярной жидкостей, ставшие классическими.

Выдающееся значение этих двух работ состоит не только в предложении нового метода в теории струй идеальной жидкости и решении многих новых задач, но и в формулировке нескольких новых идей, которые положили начало работам Московской школы теории функций комплексного переменного в гидроаэродинамике (выдающимися представителями этой школы будут С.А. Чаплыгин, затем В.В. Голубев, М.В. Келдыш, Л.И. Седов, М.А. Лаврентьев).

В статье "О присоединенных вихрях", доложенной в Московском математическом обществе в 1905 г. и опубликованной в 1906 г., Жуковский путем применения теоремы о количестве движения к бесконечно-удаленному от цилиндрического тела контуру выводит свою знаменитую теорему, согласно которой подъемная сила, действующая в набегающем на тело безграничном стационарном плоскопараллельном потенциальном

потоке, перпендикулярна его направлению и равна по модулю произведению плотности жидкости, ее скорости на бесконечности и циркуляции скорости вокруг тела (здесь Жуковский имеет в виду циркуляцию присоединенных к телу вихрей в отличие от свободных вихрей, которых по условию теоремы в потоке нет).

В частных случаях силу Жуковского вычислили Рейли (1878) для обтекания кругового цилиндра и Кутта (1902) для плавно обтекаемой дужки окружности, однако лишь Жуковский первый опубликовал выражение подъемной силы в общем виде для любого тела или системы тел, и его приоритет в этом бесспорен.

В следующей статье "О падении в воздухе продолговатых тел, вращающихся около своей продольной оси", изданной в том же году, Жуковский повторил вывод своей формулы с учетом не только присоединенных вихрей, но и присоединенных источников, сила тяги которых выражается аналогичной формулой (с расходом источника вместо циркуляции), и именно обе эти формулы следует называть теоремой Жуковского.

Асимптотически, в масштабе бесконечно-удаленного контура, любое тело по главному вектору и главному моменту действующих сил строго эквивалентно вихреисточнику, расположенному в определенной точке. Он и есть присоединенный по Жуковскому вихреисточник (или вихрь, если источника нет).

Как ныне известно, теорема Жуковского справедлива без изменений также и для баротропного движения газа (для малых дозвуковых скоростей это показали М.В. Келдыш и Ф.И. Франкль, 1934; для любых скоростей – Л.И. Седов, 1948).

Тематика прикладных работ Жуковского по гидродинамике, как и по механике, очень широка.

В 1899 г. по предложению своего коллеги по ТУ Н.П. Зимина Н.Е. Жуковский принял участие в экспериментальных исследованиях нестационарных давлений в трубах Алексеевского водопровода, завершённое замечательной работой "О гидравлическом ударе в водопроводных трубах". В ней Жуковский развил теорию этого явления в одномерной акустической постановке и вывел формулу для скачка давления, равного произведению плотности жидкости, потерянной при ударе скорости и скорости звука, зависящей от сжимаемости жидкости и упругих свойств трубопровода. Он полностью объяснил все наблюдаемые эффекты, рекомендовал безопасную скорость закрытия кранов и методику определения по индикаторным диаграммам мест утечки жидкости или скопления газов в трубе. Эта получившая всемирную известность работа Жуковского помимо своего триумфального технического значения доказала, наряду с теньевыми фотографиями Маха, факт реального существования сильных разрывов (скачков) в сжимаемых жидкостях.

Под влиянием работ Н.П. Петрова Жуковский начал гидродинамическое исследование подшипников жидкостного трения. В двух работах 1886 и 1887 гг. он уточнил теорию Петрова, а затем, в 1904 г. впервые дал, в соавторстве с С.А. Чаплыгиным, точное решение уравнений Стокса в смазочном слое при любом зазоре и эксцентриситете подшипника. (Здесь существенно предложенное С.А. Чаплыгиным представление общего решения бигармонического уравнения через две произвольные аналитические функции, найденное им независимо от Гурса около 1900 г.)

К прикладным вопросам гидродинамики относятся также работы Жуковского по теории фильтрации, опубликованные в 1899, 1890, 1906 и 1923 гг. Они содержат вывод исходных уравнений теории фильтрации и первые решения нескольких конкретных задач. В последней работе была введена новая функция – функция Жуковского, сводящая задачи плоскопараллельной фильтрации при наличии свободных поверхностей (с постоянным давлением) к задачам теории струй идеальной невесомой жидкости. Эти работы положили начало отечественной теории фильтрации (Н.Н. Павловский, Л.С. Лейбензон, С.Н. Нумеров, П.Я. Полубаринова-Кочина, В.Н. Щелкачев и др.).

В начале нашего века возникла теория пограничного слоя, уравнения которого были получены в 1904 г. Прандтлем. Однако ни Жуковский, ни Чаплыгин не заинтересовались этой теорией, и только в 30-х годах в их школе появились работы

исследователей, внесших далее значительный вклад в теорию пограничного слоя (Л.С. Лейбензон, В.В. Голубев, Л.Г. Лойцянский, К.К. Федяевский и др.).

Аэродинамика. Трудно сказать, когда Жуковский начал интересоваться проблемами летания. Мечты человека о полетах так же стары, как греческий миф. В конце прошлого века в разных странах многие инженеры делали попытки создать летающие машины тяжелее воздуха. В 1903 г. братья Райт в Америке и в 1906 г. Сантос-Дюмон в Европе совершили первые успешные управляемые полеты на аппаратах тяжелее воздуха. Величайшее техническое достижение обогнало теорию: в то время механика не могла правильно рассчитать подъемную силу крыла и тягу винта. Незнание распределения давления по поверхности крыла не позволяло судить о прочности и устойчивости самолетов в полете; их первые конструкции разрабатывались путем проб и ошибок, иногда катастрофических.

Первая публикация Жуковского по аэродинамике "К теории летания" относится к 1890 г. В ней он рассмотрел "старинный вопрос о точке опоры" и отметил, как достаточные, два способа получения силы тяги: образование вихревых поверхностей разрыва скорости (струй Гельмгольца и Кирхгофа) и использование трения подвижных поверхностей. Еще один способ создания тяги – применение гидрореактивных двигателей – Жуковский рассмотрел ранее в статьях 1882 и 1886 гг. и затем в работе 1908 г. Тяга таких двигателей, согласно формуле Д. Бернулли, равна произведению разности скорости движения судна и относительной скорости выброса воды на ее массовый расход. Жуковский несомненно владел идеей и воздушно-реактивного двигателя (ВРД), тяга которого выражается аналогичной формулой. По словам Лейбензона, Жуковский в 1903–1905 гг. изобрел и построил модель "воздушного термического реактивного двигателя", работающего на спирте. Два таких двигателя были установлены на концах лопастей винта. Опыты оказались неудачными, и к этим опередившим свое время идеям – прямого ВРД и реактивного привода винта – Жуковский больше не возвращался, используя формулу Бернулли только для расчета тяги винта (1907).

Все возрастающий интерес Жуковского к проблемам полета отражают многочисленные статьи и доклады, в которых он рассматривает механику планирующего полета птиц и открывает возможность "мертвой петли" (1891), демонстрирует фотографии Маха летящей пули (1891), рассказывает про появляющиеся летательные приборы и аппараты, эксперименты и полеты Лилиенталя, многовинтовые геликоптеры и др. В 1898 г. на X съезде русских естествоиспытателей и врачей он произносит ставшую крылатой фразу: "Человек полетит, опираясь не на силу своих мускулов, а на силу своего разума".

Открытая в 1906 г. теорема Жуковского впервые правильно объяснила причину появления подъемной силы, но не сразу была применена к теории крыла: не было ясно, как определять входящую в формулу величину циркуляции скорости.

В 1910 г. были опубликованы статьи Чаплыгина и, немного позже, статья Жуковского, в которых они различными способами построили течения вокруг теоретических крыловых профилей с одной острой выходной кромкой и конечной скоростью на ней (что и определяло величину циркуляции). Сами авторы считали условие конечности скорости на выступающих в поток острых углах обтекаемых тел (профилей) вполне естественным и никогда не придавали ему какого-нибудь особого значения или названия. В большинстве публикаций это условие называют гипотезой Жуковского или условием Жуковского – Чаплыгина, как это делали современники Жуковского; однако многие авторы из ЦАГИ и ВВА, следуя В.В. Голубеву, настаивают на названиях "гипотеза Чаплыгина" или "постулат Чаплыгина – Жуковского" и связывают его с влиянием вязкости.

В действительности это условие объясняется отнюдь не влиянием вязкости, которой в идеальной жидкости нет, а лишь физически очевидным ограничением – неспособностью жидкости выдерживать большие растягивающие напряжения. На необходимость такого ограничения при обтекании острых кромок впервые явно обратил

внимание Гельмгольц в статье 1868 г. (имеется ее русский перевод под редакцией и с примечаниями Чаплыгина, изд. "Паллас", 1902). Именно в связи с этим Гельмгольц и предложил свою струйную схему течения идеальной жидкости с образованием вихревых поверхностей разрыва, обеспечивающих конечные скорости на острых кромках. Эту идею понял и развил Жуковский в статье "К вопросу о разрезании вихревых колец" (1894) при решении задачи о движении свободного вихря в потоке, обтекающем острый клин. Кроме этой статьи, Жуковский до 1910 г. несколько раз (начиная с работы "Видоизменение метода Кирхгофа...") изображает на рисунках и использует обсуждаемое условие, хотя, действительно, не сразу применяет его для построения течения вокруг крыловых профилей. Ввиду сказанного, условие конечности скорости на выходной кромке крыла исторически справедливо, как это и делают Л.С. Лейбензон, Л.Г. Лойцянский, Н.Я. Фабрикант и др., называть условием Жуковского – Чаплыгина.

В 1910–1912 гг. Жуковский продолжает выступать со статьями и докладами по самым различным вопросам аэродинамики и авиации. В их числе – описания аэродинамических лабораторий в МУ и ТУ со схемами установок, фотографиями и результатами экспериментов. С энтузиазмом Жуковский готовит и читает в ТУ свой знаменитый курс "Теоретические основы воздухоплавания", который сразу же был издан его слушателями и затем в Париже (1916 и 1931). В этом курсе, как сказано в предисловии, автор старался "связать богатый опытный материал, накопленный аэродинамическими лабораториями, с теоретическими исследованиями рассматриваемых задач с помощью уравнений гидродинамики".

Выдающимся событием в развитии теории крылового профиля стала публикация цикла четырех близких по содержанию статей Жуковского (1910–1912). Главное в этих статьях – предложение изящного геометрического приема построения теоретических крыловых профилей путем скругления "базиса", сначала дужки окружности, затем круговой луночки (профиля Антуанетт или Рато). Жуковский получает гладкие каплевидные профили с одной бесконечно-тонкой выходной кромкой, используя давно ему известное конформное отображение, называемое в данном контексте преобразованием Жуковского. Однако получаемые так профили в том же году уже были построены Чаплыгиным путем инверсии парабол, что отмечает сам Жуковский; справедливо было бы называть эти профили профилями Чаплыгина – Жуковского. Для получения круговых луночек и их скругления Жуковский использует биполярные координаты и степенное преобразование. Позже аналогичные профили с угловой выходной кромкой были указаны Карманом и Треффцем (1918). Очевидно, что такие профили следует называть профилями Жуковского.

Обращаясь к оценке сил сопротивления, Жуковский утверждает, что основной причиной этой силы являются убегающие вихри. Он строит модель этого явления в виде точечного вихря перед острой входной кромкой тонкого профиля так, чтобы кромка была критической точкой. На такой вихрь действует сила Жуковского. При его смещении нарушается условие Жуковского – Чаплыгина, что вызывает образование другого вихря, и т.д. Как видно, модель Жуковского идейно предвосхитила современные расчеты отрывного обтекания тонких профилей по методу дискретных вихрей. Не ограничиваясь теоретическим анализом, Жуковский проводит в трубах ТУ и МУ экспериментальные измерения, удовлетворительно подтверждающие расчеты при малых углах атаки.

В настоящее время теоретические профили, как не имеющие каких-либо особых гидродинамических качеств, для крыльев не применяют, однако они имеют непреходящее научно-педагогическое значение, и их используют в качестве тестовых для методик решения прямых и обратных задач гидроаэродинамики.

В 1912 г. Жуковский начал публиковать свою прославленную вихревую теорию гребного винта в четырех статьях (1912–1918). Вопросы, связанные с теорией винта и турбомашин, уже давно привлекали его внимание. Теория винта Жуковского распространяет на пространственное обтекание лопастей его идею о присоединенных вихрях, сохраняющихся в виде свободных вихревых "шнуров", которые сходят в поток

с концов и кромок лопастей и со втулки винта. Аналогичную более простую схему обтекания крыла конечного размаха Жуковский упоминает со ссылками на "Аэродинамику" Ланчестера (1907) и обзорную статью Финстервальдера (1910). Жуковский изображает соответствующую П-образную схему вихрей, упоминая еще статьи Чаплыгина (1910) и Прандтля (1912).

Жуковский находит условия стационарности вихревых нитей на поверхности кругового цилиндра, вычисляет скорости в осредненном осесимметричном потоке, причем заменяет винт вихревым диском, рассматривает подбор лопастей винта, определяет его силу тяги и мощность. Далее Жуковский изучает связь между осевой и окружной слагающими скоростей при различных законах закрутки лопастей и, в частности, указывает, как наивыгоднейший, закон постоянной циркуляции вдоль лопасти ("винт НЕЖ"), распространяет свою формулу о подъемной силе крыла на профиль решетки в кольцевом канале; учитывает, ссылаясь на работы своего ученика и сотрудника В.П. Ветчинкина, сжатие струи за винтом и сход вихрей с кромок лопасти; дает новое весьма простое решение задачи о сплошном обтекании решетки пластин; приводит результаты испытаний винтов и вентиляторов в лаборатории ТУ. Все четыре статьи были переведены и опубликованы в Париже (1929).

Помимо непосредственного отношения к теории винта, в этих статьях Жуковского можно видеть многие идеи современной теории турбомашин, причем он вместе с Чаплыгиным обладает несомненным приоритетом в решении первых задач теории решеток.

В последние годы жизни в качестве консультанта Комиссии особых артиллерийских опытов Жуковский занялся задачами газовой динамики. Он подробно рассмотрел неустановившиеся движения тяжелой жидкости в открытом канале и газа в трубе. Можно сказать, что эти работы, вместе с теорией гидравлического удара, положили начало одномерной газовой динамике и газогидравлической аналогии. По мнению Ф.И. Франкля, Жуковский владел аппаратом, достаточным для вывода формул линейной теории сверхзвукового обтекания тел, расчета волнового сопротивления снарядов и подъемной силы крыла в сверхзвуковом потоке. Завершить и опубликовать эти расчеты Жуковскому было не суждено.

* * *

Труды Жуковского ушли в историю. Однако его научное наследие и замечательная школа Жуковского – Чаплыгина служат ему вечным памятником. С нами навсегда останется, несмотря на любые преходящие трудности, светлый облик Н.Е. Жуковского, великолепно схваченный В.В. Голубевым в биографическом очерке:

"Мощная фигура, исключительное спокойствие, задумчивый, сосредоточенный взгляд, необычайная простота, естественность в обращении с окружающими, поразительная скромность и вместе с тем уверенность в себе и чувство собственного достоинства создавали яркий образ ученого и мудреца. С философским спокойствием взирал Николай Егорович на окружающий мир; с живым интересом вникал он во всякие суждения, избегая вступать в бесполезные споры и стараясь во всяком мнении найти нечто ценное, заслуживающее внимания".

"Исключительная широта его научных дарований, счастливое сочетание геометрической интуиции, чувства живой действительности и аналитического искусства соединялись со столь же широким взглядом на людей и на жизнь. Чуждый всякой односторонности, Николай Егорович умел объединять для общего дела людей различных взглядов, разнообразных темпераментов, разного таланта и способностей, и каждый находил в работе, руководимой Николаем Егоровичем, место для приложения своих сил и дарований..."

"Вера в окружающих его учеников, убеждение в глубокой ценности научного знания, беспредельная и бескорыстная преданность науке – все эти черты слагаются в светлый и трогательный облик замечательного Человека, Ученого и Учителя, – облик, который всегда будет жить в памяти его учеников." (В.В. Голубев, 1935.)

Г.Ю. Степанов