

РАБОТЫ Н. Е. ЖУКОВСКОГО В ОБЛАСТИ ГИДРОДИНАМИКИ

Г. В. Логвинович, О. П. Шорыгин

Сейчас трудно себе представить, что в эпоху начала научной деятельности Н. Е. Жуковского в области аэрогидромеханики столь могучая сейчас отрасль механики, как аэродинамика, практически не существовала. Она стала развиваться позднее, в значительной степени как раз благодаря работам Жуковского.

Отсутствовала практическая потребность в этих сведениях, так как авиация еще не начала развиваться. В то же время исследования в области гидромеханики были уже жизненно необходимы в связи с развитием судостроения, совершенствованием корабельных двигателей, созданием турбин и гидравлических машин, гидротехнических сооружений. В связи с этим гидромеханика занимала в то время доминирующее положение в механике сплошной среды, и на решение ее задач были направлены усилия многих ученых.

Когда в 1885 г. Н. Е. Жуковский получил должность приват-доцента в Московском университете, его первый курс лекций был посвящен гидродинамике. Во вступительном слове к этому курсу Николай Егорович говорит: «... Позволяю себе выразить надежду, что вы получите интерес и любовь к предмету <гидродинамике>, которым я сам занимался всегда с таким увлечением. Я думаю, что в настоящее время великих открытий в области аэронавигации и подводного плавания такая надежда не должна быть тщетной».

Первая крупная научная работа Н. Е. Жуковского в области механики «Кинематика жидкого тела» относится к гидромеханике. Эта работа была защищена им в 1876 г. в качестве магистерской диссертации в Московском университете. Исследование Н. Е. Жуковского состоит из четырех глав, в которых разбираются вопросы движения и деформаций бесконечно малой частицы жидкости, в частности зависимость этих деформаций от кривизны линий тока, теория критических точек, вопросы ускорений точек движущейся жидкости.

Один из биографов Н. Е. Жуковского профессор А. А. Космодемьянский отмечает, что широкую известность получили результаты

этой работы, относящиеся только к несжимаемой жидкости, анализ же движения сжимаемой сплошной среды, данный Жуковским, остается малораспространенным до сих пор. В дальнейшем это исследование вошло в качестве первого раздела в его «Курс лекций по гидромеханике».

В 1885 г. в журнале Русского физико-химического общества опубликовано выдающееся исследование Н. Е. Жуковского «О движении твердого тела, имеющего полости, заполненные однородной капельной жидкостью». В этой работе исследуется проблема, имевшая в то время чисто теоретическое значение.

Однако дальнейшее развитие техники, в особенности создание жидкостных ракет, выявило исключительную практическую ценность полученных в ней результатов. Николай Егорович построил общую теорию движения жидкости, заполняющей полости, и рассмотрел динамику твердого тела с жидкими включениями в рамках теории идеальной жидкости. Разработанный им метод решения задач этого класса позволил рассмотреть огромный цикл конкретных примеров полостей и дать в каждом случае исчерпывающие данные о движении жидкости, линиях тока, давлениях и т. д. Н. Е. Жуковский доказал, что движение тела с жидкими включениями отличается от движения твердого тела. При поступательном движении жидкость, заключенная внутри тела, при любой форме полостей ведет себя как часть твердого тела. Однако при вращательном движении картина иная. Оказалось, что жидкие включения также можно представить как отдельные эквивалентные твердые тела, входящие в состав всего рассматриваемого тела, однако их моменты инерции существенно зависят от формы жидких включений и всегда меньше моментов инерции отвердевшей жидкой массы относительно любой оси, проходящей через ее центр тяжести.

Так, если жидкость заполняет сферическую полость, то (в условии идеальной жидкости) вращение полости около ее диаметра не вызывает какого-либо движения жидкости и момент инерции эквивалентного тела равен нулю. Однако если жидкость в сфере разделена плоскостью, содержащей этот диаметр, то, как показывает теория Жуковского, момент инерции составит 0,5968 от момента инерции отвердевшей жидкой массы.

Николай Егорович показал, что в том случае, если полость, заполненная жидкостью, многосвязна и жидкость имеет некоторое начальное движение, то движение тела происходит так, как будто внутри него имеется гироскоп.

В конце этой работы затрагивается вопрос о влиянии вязкости на поведение жидкости в полостях. Чрезвычайная сложность этой проблемы не позволила ему довести это исследование до столь же исчерпывающих результатов, однако им доказана очень важная теорема об асимптотическом поведении системы тело — жидкость при наличии вязкости. Он доказал, что «если в теле имеется какая-либо полость, заполненная трущейся жидкостью, и такой системе сообщены какие-нибудь начальные скорости, то движение ее будет стремиться к предельному состоянию, при котором одна из главных осей инерции рассматриваемых масс займет направление главного момента начальных

количеств движения, и вся система будет вращаться около нее как одно неизменное тело с постоянной угловой скоростью, получаемой от разделения главного момента начальных количеств движения на момент инерции системы относительно этой оси».

Жуковский далее замечает: «Не этой ли теоремой следует объяснить то обстоятельство, что, несмотря на всякие случайные начальные скорости, планеты вращаются около своих главных осей инерции?» При этом он исходил из представлений о жидком расплавленном ядре планеты, представляющем собой очень вязкую жидкость.

В настоящее время механика твердого тела с жидкими включениями получила дальнейшее успешное развитие в связи с проблемами космонавтики и баллистики. К упомянутым выше задачам добавились проблемы механики тела, имеющего полости, только частично заполненные жидкостью, — количество жидкого топлива в баках ракет меняется в процессе полета, а на поверхности жидкости могут возникать волны.

Перейдем теперь к другой важной проблеме гидродинамики, при решении которой особенно ярко проявился талант Н. Е. Жуковского как теоретика-исследователя.

В то время перед гидродинамикой стояла проблема объяснения формирования сопротивления, возникающего при движении в сплошной среде различных тел. Гидродинамика идеальной жидкости прямым образом не могла дать ответ на этот вопрос. В связи с этим у ряда ученых возник интерес к задачам об обтекании тел с отрывом струй, когда за телом образуется как бы затененная область с пониженным давлением, отделенная поверхностями тангенциального разрыва от остального потока. При этом в постановке первых «струйных» задач вовсе не предполагалось нарушение сплошности среды, наблюдаемой при кавитации. Интеграл нормальных давлений по контуру тела дает в этом случае ненулевое значение силы сопротивления. В результате усилий ряда исследователей — Гельмгольца, Рэлея, Кирхгофа, Бобылева — были решены плоские задачи обтекания некоторых простейших тел. В дальнейшем оказалось, что полученные значения сопротивления далеки от наблюдавшихся в опытах, так как при реализовавшихся в то время режимах обтекания тел действовали другие физические факторы. Струйные задачи приобрели громадное практическое значение в наше время, когда рост скоростей движущихся в жидкости тел (винтов, кораблей, торпед и т. д.) стал приводить к явлениям кавитации. В возникающих при этом течениях наблюдаются разрывы сплошности жидкости с образованием свободных границ, а область за движущимся телом заполняется насыщенными парами воды или другими газами.

Существовавшие до работ Жуковского методы решения струйных задач были сложными и не позволяли рассмотреть некоторые важные типы течений, например течения с несколькими критическими точками.

В работе «Видоизменение метода Кирхгофа», опубликованной в 1890 г. в «Математическом сборнике», Жуковский предлагает новый метод решения упомянутых задач. По этому поводу академик Л. С. Лейбензон пишет: «...Жуковский излагает свое прекрасное

открытие, которое он, по свойственной ему скромности, называет видоизменением метода Кирхгофа. Им открыт новый способ, позволяющий струйную теорию Кирхгофа приспособить к заданному числу струй и критических точек... Только после исследований Н. Е. Жуковского эта теория получила надлежащее значение и должна называться теорией Жуковского — Кирхгофа».

Остановимся кратко на сути метода Кирхгофа и того нового, что внес в эту проблему Николай Егорович. Рассмотрим плоскую задачу об обтекании контура с прямолинейными стенками. Пусть $w = \varphi + i\psi$, где $\varphi(x, y)$ — потенциал скорости, а $\psi(x, y)$ — функция тока. Вместо того чтобы искать комплексный потенциал w как функцию комплексной переменной $z = x + iy$, Кирхгоф использует функцию

$$v_0 \frac{dz}{dw} = \zeta(w).$$

Если функция $\zeta(w)$ найдена, то путем интегрирования можно найти и функцию $z(w)$:

$$z = \frac{1}{v_0} \int \frac{v_0 dz}{dw} dw = \frac{1}{v_0} \int \zeta dw.$$

Обращение функции $z(w)$ оказывается излишней и к тому же практически очень трудной операцией. Трудность метода Кирхгофа заключается в том, что конформную связь областей ζ и w при заданной форме обтекаемого тела можно найти только в очень редких случаях. В резюме к работе «Видоизменение метода Кирхгофа» Жуковский пишет: «В предлагаемом нами изменении метода Кирхгофа мы даем возможность обратиться к решению определенной задачи, не прибегая наперед к конформному преобразованию областей контуров, соответствующих данной задаче, и тем устраняем, как это было в первоначальном методе Кирхгофа, лишнюю операцию. При этом мы не стесняем задачи ни числом нулевых точек, ни числом струй. Вследствие этого нашим методом удалось решить много новых задач, которые не поддавались методу Кирхгофа».

Вместо функции $\zeta = v_0 \frac{dz}{dw}$ Н. Е. Жуковский ввел в рассмотрение функцию

$$\omega = \ln \zeta = -\ln \frac{1}{v_0} \frac{dw}{dz} = -\ln \left(\frac{v}{v_0} \right) + i\theta,$$

где θ — угол между вектором скорости и осью абсцисс x . Далее, вместо того чтобы искать непосредственно связь между w и ω , Жуковский выражает обе функции через параметрическое переменное t , изменяющееся в верхней полуплоскости. Зная $\omega(t)$ и $w(t)$, можно через параметр t найти все интересующие величины и геометрию течения.

Для этого надо найти для каждого t положение точки в плоскости z и скорость в этой точке, т. е. определить $z(t)$ и $\zeta(t)$ на основании

$$\zeta = e^{\omega(t)}, \quad z = \frac{1}{v_0} \int \zeta dw = \frac{1}{v_0} \int e^{\omega} \frac{dw}{dt} dt.$$

Функция ω обладает замечательным свойством — в случае если обтекаемый контур состоит из прямолинейных отрезков, границы области изменения ω будут состоять из прямых, параллельных осям координат, так как вдоль свободных поверхностей постоянна действительная, а вдоль твердых — мнимая часть функции ω . Область изменения функции w также ограничена прямыми $\psi = \text{const}$. Таким образом, для отображения областей изменения w и ω на верхнюю полуплоскость параметрического переменного t можно использовать известную формулу Кристоффля — Шварца.

Используя свой метод, Н. Е. Жуковский решил такое множество новых конкретных задач, практически недоступных без применения его идеи, что их в коротком очерке трудно даже перечислить.

Эти решения отвечают на все важные вопросы гидротехники — водосливы, истечение жидкости из сосудов, течения в ограниченных каналах с препятствиями и т. д.

В наше время значение струйных задач заключается еще и в том, что они служат простейшей моделью, необходимой для понимания более сложных пространственных течений, а во многих случаях и основой для приближенных решений, как, например, в случае кавитирующих подводных крыльев.

Научная деятельность Н. Е. Жуковского была связана с двумя крупнейшими учебными заведениями России — Московским университетом и Императорским техническим училищем (позднее переименованным в МВТУ). Жуковский не мог ограничиться только исследованиями фундаментального характера, его в такой же степени привлекали задачи развивающейся техники России. Знакомство и совместная работа с ведущими учеными и инженерами, сосредоточенными в ИТУ, а также объединенными в Политехническом обществе, определили круг его интересов в области прикладных задач механики.

В течение многих лет Николай Егорович уделял большое внимание проблемам гидравлики. Наиболее значительный цикл его исследований в этой области был связан с проблемами водоснабжения разраставшейся Москвы. В конце XIX века разрабатывался проект расширения Мытищинского водопровода, источником которого были грунтовые воды. Н. Е. Жуковский был привлечен к работе специальной комиссии, занимавшейся этим вопросом.

Исследуя проблему движения грунтовых вод в пористой среде, Н. Е. Жуковский установил неожиданную и очень важную зависимость уровня грунтовых вод от барометрического атмосферного давления. Оказалось, что по величине колебаний уровня можно оценить общие запасы годной к использованию грунтовой воды в данном районе. Эти исследования заставили отказаться от мытищинского проекта, так как

запасы воды оказались там недостаточными. В результате было принято решение построить Рублевскую водопроводную станцию, использовавшую воду реки Москвы в верхнем течении. Это был первый крупный вклад Николая Егоровича в важную техническую проблему обеспечения Москвы водопроводной водой. Результаты исследований опубликованы в статье «Теоретические исследования движения подпочвенных вод» в журнале Русского физико-химического общества в 1889 г.

После пуска новой водопроводной станции в Рублеве неоднократно происходили аварии на магистрали водопровода, состоящего из труб диаметром 24 дюйма. Для выяснения причин аварий была создана комиссия, к работам которой также был привлечен Н. Е. Жуковский. Исследования этой проблемы он начал с экспериментов.

В этих целях во дворе водокачки были проложены трубы диаметром 2, 4 и 6 дюймов и соединены с главной магистралью города. Трубы были снабжены системой задвижек и других необходимых устройств. На основании проведенных опытов Жуковский установил, что опасные напряжения в стенках труб возникают при гидравлических ударах в результате распространения в трубах ударных волн. В работе «О гидравлическом ударе в водопроводных трубах», опубликованной в 1898 г. в «Бюллетенях» Политехнического общества, Жуковский отмечает: «... Инженеры, которые занимались этой задачей, не обратили внимания на то, то при весьма быстром закрытии задвижки вода останавливается и давление повышается около задвижки, и это состояние воды передается по трубе по закону распространения волнообразного движения. Я полагаю, что это обстоятельство было упущено из виду потому, что наблюдения не делались над длинными трубами; в коротких же трубах, при громадной скорости распространения ударной волны, поднятие давления представляется происходящим вдоль всей трубы одновременно». Необходимо отметить, что при существовавшей тогда измерительной и регистрирующей аппаратуре было непросто даже на достаточно длинном трубопроводе обнаружить прохождение ударных волн. Здесь раскрывается другая грань таланта Н. Е. Жуковского как исследователя — талант инженера и экспериментатора.

Проведенный им теоретический анализ проблемы показал, что основными факторами, влияющими на распространение ударных волн, являются сжимаемость воды и упругость стенок водопроводных труб.

В результате исследования Жуковский делает следующие основные выводы:

«1. Гидравлический удар распространяется вдоль водопроводной трубы с постоянной скоростью, величина которой не зависит от силы удара. Эта скорость зависит от вещества трубы и от отношения толщины ее стенок к диаметру трубы. Для труб средних диаметров (от 2 до 6 дюймов) эта скорость около 600 сажен в секунду (1280 м/с), а для труб больших диаметров (24 дюйма) около 470 сажен в секунду (1000 м/с).

2. Гидравлический удар распространяется по водопроводной трубе с одинаковой силой. Величина его пропорциональна потерянной при

ударе скорости течения воды и скорости распространения ударной волны в трубе.

3. Опасное возрастание ударного давления происходит при переходе ударной волны с труб большого диаметра на трубы малого диаметра. При этом, достигнув конца тупиков, сила ударного давления удваивается. Такое удвоение может повториться несколько раз, так что давление может при неблагоприятных условиях возрасти до больших размеров.

4. Простейшим способом ограждения водопровода от гидравлических ударов являются приспособления к медленному закрытию кранов. При этом продолжительность закрытия должна быть пропорциональна длинам труб. Воздушные колпаки надлежащих размеров, поставленные при кранах и задвижках, почти совершенно уничтожают гидравлический удар и не пропускают через себя..., но сохранение воздуха в колпаках весьма затруднительно».

В результате исследований Жуковского вопрос о гидравлическом ударе был полностью разъяснен, а его формулы являются основой для расчетов этого явления в наше время.

Работа о гидравлическом ударе принесла Жуковскому мировую известность.

Наряду с этими наиболее крупными работами в области гидродинамики и гидравлики Н. Е. Жуковским проведены исследования по ряду ключевых вопросов гидродинамики, возникавших либо под влиянием требований развивающейся техники, либо в результате дискуссий и обсуждений проблем механики с другими учеными. Упомянем здесь работы: «О спутной волне» (опубликована в 1909 г.), в которой он в более простой и общей форме, чем Митчел, исследует проблему волнового сопротивления судна; «О форме судов» (1880), где рассмотрена проблема обтекания судов с острыми носовыми обводами; «О трении смазочного слоя между шипом и подшипником» (1906); «К теории судов, приводимых в движение силою реакции вытекающей воды» (1908); «О снежных заносах и заилении рек» (1919). Для обширной области приложений существенна фундаментальная работа Н. Е. Жуковского о поведении тел в ускоренных потоках, развивающая исследования Бьеркнеса. Эта работа явилась основой учета объемных сил при продувках в аэродинамических трубах, а также поведения морских мин и подводных лодок при волнении в море.

Обширный комплекс исследований Н. Е. Жуковского в области вихрей поставил его в ряд основоположников авиационных и корабельных наук. Знаменитая теорема о подъемной силе присоединенного вихря ($Y = \rho V \Gamma$) легла в основу построения теории крыла, пропеллера и огромного множества гидравлических и аэродинамических машин. Вообще, весь комплекс исследований по вихрям — о «разрезании» вихрей, о взаимодействии вихревых колец, о взаимодействии вихрей с телами и ряд других работ существенно углубили теорию вихревого движения, создали предпосылки бурного развития авиационной и морской техники в наше время.

Н. Е. Жуковский не только теоретик, он инженер и организатор творческих коллективов: участвует в создании первых планеров и аэропланов, организует подготовку первых авиаторов, изучает бомбометание, формирует первую когорту авиаторов и ученых, которые заложили основу авиационной науки и техники в России и, в частности, основали ЦАГИ. Наследие Н. Е. Жуковского столь огромно, что в небольшом очерке просто невозможно полностью воссоздать картину его научного творчества.

Рукопись поступила 25/X 1996 г.