

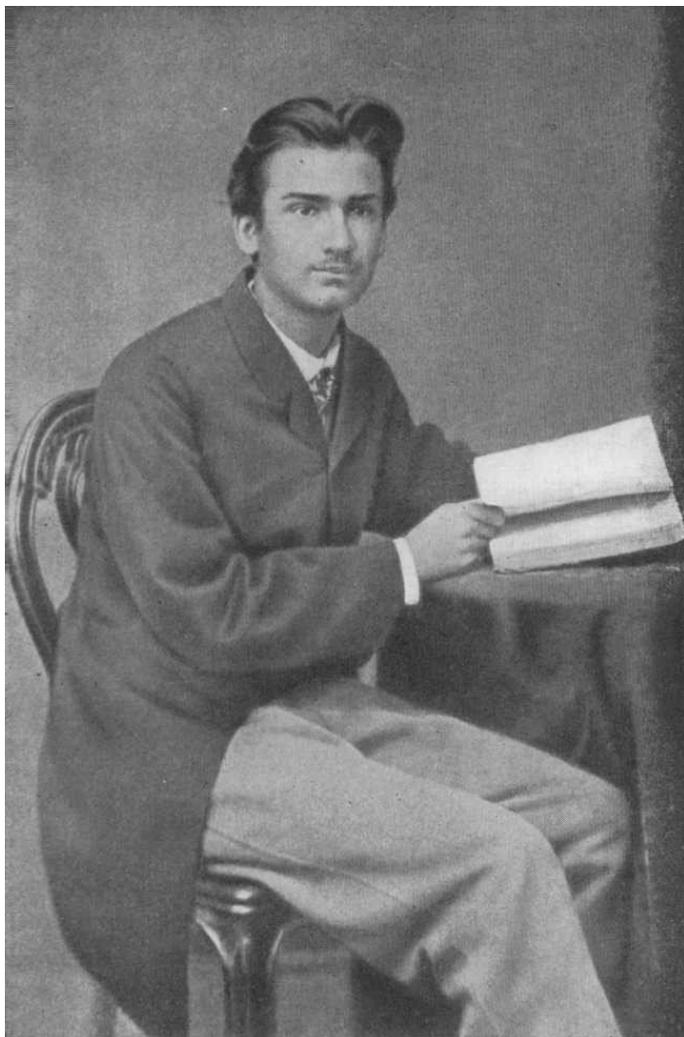
Лекция 4

- Московский университет
- Вклад в гидромеханику Н.Е. Жуковского

Николай Егорович Жуковский (1847 — 1921)

- Заслуженный профессор Московского университета, профессор теоретической механики Императорского Московского технического училища; член-корреспондент Императорской Академии наук по разряду математических наук (1894).



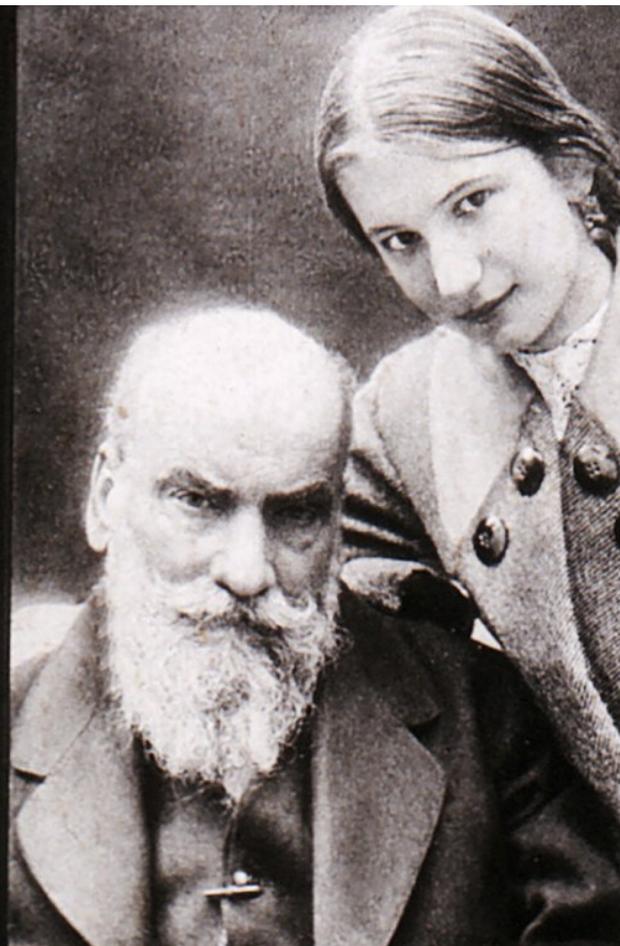


- 1858 - 4-ая московская гимназия
- 1864 - Московский университет
(Ф.А.Слудский, А.Ю. Давыдов, В.Я. Цингер)
- 1868 - Институт путей и сообщения
(Петербург)
- 1869 – д. Орехово
- 1871– ИМТУ (преподаватель
математики)
- 1872 - Московская практическая
академия коммерческих наук
(преподаватель механики)
- 1876 - Магистерская диссертация
«**Кинематика жидкого тела**»

- 1882 – докторская диссертация
«**О прочности движения**»
- 1885 – преподаватель теоретической механики в
Московском университете
- 1886 – экстраординарный профессор в
Московском университете
- 1887 – профессор ИМТУ (кафедра механики)
- 1894 – член-корреспондент
Петербургской Академии Наук
- 1905 - президент Московского
математического общества

И почти всегда рядом с отцом дочь Елена—его верная помощница, математическими способностями которой он так гордился.

23





- «Отец русской авиации» — профессор Николай Егорович Жуковский почти 50 лет вел преподавание в Московском университете (МГУ) и Московском техническом училище (МВТУ). Он создал превосходные учебники по курсу теоретической механики для университетов и высших технических учебных заведений. Его педагогические воззрения нельзя отделить от его научного творчества, его научного стиля.

- В 1901 г. издан по запискам слушателей курс «Прикладная механика»
- В 1909 г. издан по запискам слушателей специальный курс регулирования машин
- 1909 г. – «Сведение механической задачи о кинематической цепи к задачам о рычаге»

Кинематика жидкого тела в ранних трудах Н.Е.Жуковского

- «Мои главные работы по гидромеханике представляют три статьи: «Кинематика жидкого тела», «Движение твердого тела с полостями, наполненными жидкостью» и «Видоизменение метода Кирхгофа». Во всех своих работах я стремился нарисовать картину движения, дать его отчетливый геометрический образ»

Эта работа была опубликована в **1876г.** в VIII томе «**Математического сборника**», издаваемого Московским математическим обществом. Её Николай Егорович представил физико-математическому факультету Московского университета для соискания **степени магистра прикладной математики.**

Защита прошла успешно, оппонентами были: профессор физики **А.Г. Столетов** (1839—1896), декан физико-математического факультета математик-геометр, **В.Я. Цингер** (1836—1907) и профессор механики **Ф.А. Слудский** (1841 —1897), возглавлявший в то время кафедру прикладной математики.

Кинематика жидкого тела в ранних трудах Н.Е.Жуковского

«Мы старались сделать изложение по возможности простым, предпочитая, где было возможно, геометрические соображения аналитическим и пользуясь криволинейными координатами, имеющие непосредственное кинематическое значение в разбираемом вопросе»

Прежде всего, Жуковский рассматривает исследования, примерно, за 50 лет (1827-1874), проведенные в различных странах такими крупными учеными как Г. Гельмгольц (1858), Г. Кирхгоф (1874), О. Коши (1827), В. Томсон (1867) и другими.

Анализ сочинений выбранных авторов позволяет Н.Е. Жуковскому сделать вывод, что теория движения простейших неизменяемых систем развивалась на основе обобщения идей о движении твердого тела, общая же теория движения изменяемой системы базировалась на соображениях теории упругости и гидродинамики; при этом оба направления развивались независимо друг от друга. Магистерская диссертация Н.Е. Жуковского «Кинематика жидкого тела» была посвящена той области механики, в которой он работал всю свою жизнь и в которой им были достигнуты крупные успехи.

- Кинематика, т.е. учение о геометрической стороне движений для случая твердого тела, с аналитической точки зрения, была разработана Л. Эйлером еще во второй половине XVIII века. В работе Л. Пуансо «Начала статики» (1803 г.) была дана наглядная, геометрически ясная картина равновесия. Краткий оригинальный его трактат «Новая теория вращения тел» (1834) посвящён в основном вопросам кинематики и динамики твердого тела, с неподвижной точкой. Он явился новым существенным вкладом учёного в эти разделы механики. В кинематике он ввёл: понятие **пары вращений** (с доказательством её эквивалентности поступательному движению); понятие **мгновенной оси вращения** твёрдого тела, совершающего сферическое движение; понятие центральной оси системы вращений и поступательных движений (**мгновенная винтовая ось**).

Задача, которую поставил Жуковский была сложнее. Вместо твердого тела Николай Егорович изучал движение жидкости, частицы которой могли свободно перемещаться относительно друг друга. По кинематике жидких тел первые работы принадлежали Ж.Лагранжу и О.Коши, но они носили исключительно аналитический характер. Задача, которую ставил в своей работе Жуковский, состояла в том, чтобы методами геометрии внести наглядность и ясность в эту сложную область механики.

Первое, что замечает автор – работа «Кинематика жидкого тела» посвящена выявлению законов **распределения скоростей и ускорений частицы жидкости** и представляла по существу введение в общий курс гидромеханики.

Второй вывод Жуковского – в кинематике жидкого тела использовался только аналитический метод исследования, а геометрическая теория движения изменяемой системы находится на первых степенях своего развития. Однако обстоятельное геометрическое исследование может, по мнению Жуковского, «**всего более осветить трудные вопросы гидродинамики**». Далее он проводит блестящее исследование, предпочитая, где было можно, геометрические соображения аналитическим.

- **В первой главе** изложено движение бесконечно малой жидкой частицы, «при этом мы [Н.Е.Жуковский] старались обобщить различные воззрения на этот вопрос, исходя из одного общего исследования о свойствах поверхности удлинения Коши».
- **Вторая глава** «Исследование течения жидкости» посвящена изучению линий токов и скоростей движущейся жидкости. В ней Жуковский вводит новый термин, «характеризующий, как линии токов, так и скорости точек жидкости, - *течение жидкости*». Глава начинается общим геометрическим и кинематическим исследованием течения жидкости и кончается специальным изучением течения жидкости без сжатия и вращения.
В этой главе Н.Е. Жуковскому принадлежит общий метод исследования и теоремы о зависимости изменения жидкой частицы от кривизны линий токов и теория критических точек. Здесь он дает определение **особых точек**. «Будем называть критическими точки, в которых линии токов пересекаются, соприкасаются или имеют бесконечно большую кривизну».

- **Третью главу** под названием «**Сложение и разложение течений жидкости**» Николай Егорович называет «компилятивной»; в ней излагаются согласно с приемами исследования, предложенными во 2-й главе, учение о сложении и разложении течений жидкости, которое установили Гельмгольц, Рох, Томсон, Липшиц и Бельтрам.
- **Четвертая глава** носит название «**Об ускорениях точек движущейся жидкости**». Н.Е. Жуковский начинает ее «общими теоремами об ускорениях, стараясь при этом выставить с возможной ясностью идеи В.В.Преображенского и теорему Липшица, которая на наш взгляд, должны играть высокую роль в гидродинамике». Глава оканчивается **приложением** найденных общих результатов к исследованию перманентного движения **несжимаемой жидкости** и движения несжимаемой жидкости, для которой давление равно нулю. В этой главе Н.Е. Жуковскому принадлежит **обобщение теоремы Кориолиса** и многие новые результаты по перманентному движению, которые значительно пополняют теоремы найденные Клебшем.

- Важно отметить, что во всей работе рассматривается общий случай **сжимаемой жидкости** и отмечаются **особенности жидкости несжимаемой**.
- Именно историко-научный анализ, позволил Жуковскому утверждать, что «Та высокая степень ясности, которая была внесена в область динамики твердого тела геометрическими исследованиями движения неизменяемой системы, заставляет ожидать значительного успеха гидродинамики от сближения ее с кинематикой изменяемой системы».

- В **1882** году Жуковский защитил диссертацию на степень **доктора прикладной математики**, представив работу «**О прочности движения**». С 1886 года он экстраординарный профессор **Московского университета по кафедре механики**, а с 1887 года занимает одновременно должность профессора по кафедре аналитической механики в **Московском высшем техническом училище**. С этими высшими учебными заведениями тесно связана вся дальнейшая педагогическая и научная деятельность Жуковского.
- Работа Н. Е. Жуковского в Московском университете, его активное участие в научных заседаниях Московского математического общества позволяли ему быть в курсе всех новейших достижений теоретической мысли в области физико-математических наук. Деятельность Жуковского в МВТУ связывала его с практическими задачами развивающейся промышленности России. Сложные расчеты новых конструкций, установок и сооружений приносили к Николаю Егоровичу его коллеги и ученые-инженеры для консультаций и экспертизы. Он был в центре **передовой технической мысли нашей страны**. «Я с удовольствием вспоминаю беседы с моими дорогими товарищами по техническому училищу, в котором с 1872 года протекает моя педагогическая деятельность. Они указывали мне на различные тонкие вопросы техники, требующие точного разрешения. От них научился я сближению научного исследования с наблюдаемой действительностью и уметь пользоваться приближением».

Кинематика жидкого тела в ранних трудах Н.Е.Жуковского

Работа «О движении твердого тела, имеющего полости, наполненные капельной жидкостью» (1885), была удостоена Московским университетом премии профессора Брашмана.

Эта работа имеет принципиальное значение не только для гидромеханики. Методы, разработанные Жуковским, дают возможность решать задачи в области астрономии (исследование законов вращения планет), баллистики (теория движения снарядов с жидким наполнением).

- Решение первых задач об обтекании тел жидкостью и о силах, которые при этом возникают, принадлежат Л. Эйлеру; Ж. Лагранжем разработаны общие методы для такого исследования.
- Н.Е. Жуковский доказал, что при изучении поступательных движений тел с жидким наполнением мы можем пользоваться теми же самыми уравнениями механики, что и при изучении сплошного твердого тела. Вращательное движение твердого тела вызывает относительное движение жидкости в полостях, и законы вращательного движения твердого тела с жидким наполнением будут совершенно другими.

Кинематика жидкого тела в ранних трудах Н.Е.Жуковского

- Николай Егорович выяснил, что относительное движение идеальной жидкости в полостях вполне определяется движением тела.
Как только движение жидкости будет определено (считая скорости на границах полостей известными), тогда, рассматривая твердое тело и жидкость в полостях **как одну динамическую систему**, можно получить основные дифференциальные уравнения движения тела.
Оказывается, что движение тела совершается так, как будто бы жидкие массы были заменены эквивалентными твердыми телами.

Массы этих эквивалентных тел равны массам жидких наполнений; **центры тяжести** эквивалентных тел совпадают с центрами тяжести объемов жидкостей, заполняющих полости.

Однако **моменты инерции** эквивалентных тел относительно любой оси, проходящей через их центры тяжести, будут *меньше* моментов инерции соответственной жидкой массы относительно той же оси.

Если же тело с жидким наполнением имеет некоторое начальное движение, то в этом случае его движение происходит так, как будто внутри тела находится **вращающийся гироскоп**, кинематический момент которого вполне определяется начальным движением жидкости.

- Эти рассуждения справедливы для **идеальной** жидкости. Естественно, что реальные жидкости тем ближе к идеальной, чем меньше внутреннее трение при движении частиц жидкости друг относительно друга. Например, вода, спирт, бензин имеют очень малую вязкость, малое внутреннее трение, а *смазочные масла, мед имеют большое внутреннее трение (большую вязкость)*.
- Для труднейшей проблемы гидромеханики, когда **вязкостью** жидкости пренебречь нельзя (даже для случая полостей простейших геометрических очертаний), Жуковский указал метод определения того **предельного движения**, которое будет иметь тело по истечении достаточно большого времени.
- Он сформулировал теорему.

Кинематика жидкого тела в ранних трудах Н.Е.Жуковского

- *Теорема:* «Если в теле имеется какая-нибудь полость, наполненная 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 неизменяемое тело с постоянной угловой скоростью, получаемой от деления главного момента начальных количеств движения на момент инерции системы относительно этой оси».

Поясним эту теорему Жуковского.

Для однородного тела главные центральные оси инерции будут совпадать с осями симметрии. Так, например, для однородного шара любая прямая, проходящая через центр шара, будет главной осью инерции. Землю, на которой мы живем, можно приближенно рассматривать как немного сплюснутый шар, плотность этого шара зависит только от глубины погружения. Внутренняя часть Земли находится, по-видимому, в расплавленном состоянии, т. е. представляет собой сильно вязкую жидкость. У немного сплюснутого шара (точно говоря, эллипсоида вращения) одна из главных центральных осей инерции будет совпадать с «осью Земли», т. е. с прямой, проходящей через Северный и Южный полюсы и являющейся осью симметрии эллипсоида вращения. Жуковский видел в факте вращения Земли около своей оси симметрии подтверждение полученных им теоретических результатов.

- «Не этой ли теоремой, - пишет в заключении своего сочинения Жуковский, - следует объяснить то обстоятельство, что, несмотря на всякие случайные начальные скорости, планеты вращаются около своих главных осей инерции?» В факте **вращения Земли около своей оси симметрии** он видел подтверждение полученных им теоретических результатов.
- Кстати сказать, что строгая теория **движения артиллерийских снарядов с жидким наполнением** основывается на методах, развитых Жуковским в этой работе.
- Особенно важными и интересными являются работы по **устойчивости движения ракет с баками, частично заполненными жидким окислителем и горючим.**
- В наши дни ученые успешно продолжили исследования Николая Егоровича по проблеме движения тел с полостями, наполненными капельной жидкостью.

Характерно, что в этом теоретическом и математическом по своему стилю трактате содержится описание собственных **экспериментов** Жуковского, которые были выполнены для проверки некоторых частных результатов, выведенных им теоретическим путём.

Здесь же он наметил новые опыты, которые следовало бы провести для дальнейшего изучения вопроса и для определения численных значений некоторых параметров движения.

Это сочинение Жуковского положило начало циклу исследований, имеющих большое научное и практическое значение. Работа была представлена на соискание премии профессора Брашмана. Отзыв на это выдающееся произведение механики был составлен учителем Николая Егоровича, профессором Ф.А. Слудским. Он писал:

«Если бы сочинение Николая Егоровича состояло только из шести последних страниц, то и тогда оно было бы вполне достойно премии профессора Брашмана».

Впоследствии оно неоднократно служило исходной работой в ряде важных научных и технических исследований.

Кинематика жидкого тела в ранних трудах Н.Е.Жуковского

- В работе «**Видоизменение метода Кирхгофа**» Н.Е. Жуковский дает оригинальный и эффективный метод решения важнейшей задачи гидромеханики, относящейся к *теории струй*. Развитие этой теории тесно связано с определением сил воздействия потока воздуха на движущиеся в нем тела, что было использовано в дальнейшем в его работах по аэродинамике.
- .

Кинематика жидкого тела в ранних трудах Н.Е.Жуковского

- Жуковский видоизменил метод Кирхгофа, позволяющий решать задачи при одной критической точке, и разработал свой наглядный геометрический метод, позволяющий изучить струйное течение жидкости при любом числе струй и критических точек.

Решение первых задач об обтекании тел жидкостью и о силах, которые при этом возникают, принадлежат еще **Эйлеру; Лагранжем** разработаны общие методы для такого исследования.

Известно, что в механике приходится при изучении движений тел вносить те или иные упрощения, заменяя реальные условия некоторыми фиктивными, не существующими в природе, но близко к ним подходящими. В гидромеханике вместо действительных жидкостей, между частицами которых существуют силы сцепления (вязких жидкостей) рассматривают так называемые идеальные жидкости, совершенно лишенные вязкости.

Оказывается, что для решения некоторых вопросов такое упрощение достаточно. Применение этого упрощения к задаче обтекания тел приводит к совершенно парадоксальному выводу: оказывается, что идеальная жидкость, обтекающая погруженное в жидкость тело, не оказывает на тело никакого давления (так называемый парадокс Даламбера). Опыт показывает, что, наоборот, жидкость, обтекающая тело, оказывает на тело иногда очень большое давление. Таким образом, предположение о жидкости, совершенно лишенной сил вязкости и плавно обтекающей погруженное в нее тело, не соответствует тому, что имеет место в действительности, когда не идеальная, а реально существующая жидкость обтекает погруженное в жидкость тело.

Французский ученый А. Навье и англичанин Дж. Стокс, которые вывели уравнения, для решения задач, связанных с течением вязкой жидкости, учитывали влияние вязкости. Другой подход – можно оставить идеальную жидкость, но учесть то обстоятельство, что плавного обтекания в действительности нет; сзади обтекаемого тела струи текущей жидкости срываются, и образуется область с беспорядочным сравнительно медленным движением – область гидродинамической тени. Течения с образованием таких струй и гидродинамической тени впервые были изучены для некоторых частных случаев в работах Г. Гельмгольца и Г. Кирхгофа, ученых, которых Николай Егорович знал не только по их работам, но и слушал их во время своей первой заграничной поездки в 1877 году.

Решение задач на течение жидкостей с образованием срывов в общем случае представляет очень большие трудности так же, как и в случае вязкой жидкости; но, как это выяснил Кирхгоф, есть один случай, где исследование упрощается; это случай так называемого плоскопараллельного течения. В математике в XIX столетии трудами крупнейших ученых была разработана теория функций комплексного переменного, облегчающая изучение плоскопараллельных течений жидкости. Кирхгоф разработал метод решения задач на обтекание со срывом пластинок в условиях плоскопараллельного течения. Используя этот метод, английский ученый Рэлей получил свою знаменитую формулу, решая вопрос о силах, действующих на плоскую пластинку, помещенную в потоке, набегающем на плоскую пластинку и образующем срыв.

Но число задач, решенных методом Кирхгофа, было весьма ограничено.

В работе «**Видоизменение метода Кирхгофа**» Н.Е. Жуковский дал существенное усовершенствование метода, предложенного для решения подобных задач Кирхгофом, и разобрал своим методом большое число частных примеров, например, решил задачу на **обтекание пластинок различного сечения** (пластинки ковшеобразной формы или пластики, помещенной в потоке, ограниченном двумя параллельными твердыми стенками, и т.д.).

Хорошо известно, что если тело произвольной формы перемещать в жидкости или газе равномерно, поступательно и прямолинейно, то эффект действия окружающей среды можно представить в виде системы сил, распределенных по поверхности движущегося тела и не зависящих от «истории» движения тела. Эта система сил может быть в общем случае приведена к одной результирующей силе и к одной результирующей паре сил. Проекция результирующей силы на направление скорости поступательного движения тела называется **лобовым сопротивлением**. В реальных жидкостях и газах результирующая поверхностных сил воздействия среды складывается из местных сил трения, расположенных в касательных плоскостях к поверхности обтекаемого тела, и местных сил нормальных давлений, направленных по перпендикулярам к поверхности, ограничивающей тело.

Проекция на направление скорости движения тела результирующей всех местных сил нормальных давлений называется **сопротивлением давления**. Возникновение сопротивления давления обусловлено вязкостью жидкости или газа. Поток жидкости, без трения, плавно обтекающей какое-либо тело, приводит к такому распределению местных нормальных давлений по поверхности тела, что результирующая этих давлений не дает составляющей в направлении движения тела. Если при обтекании тела образуются свободные струи, тогда давление в струйной области понижается по сравнению с давлением в невозмущенном потоке. Сила сопротивления, возникающая при образовании струй, может быть рассчитана методами, предложенными Н. Е. Жуковским

Жуковский вводит две ортогональные линии, которые называет ***образующей и направляющей*** сетями.

Причем, образующая сеть дает в плоскости изображения линии тока и эквипотенциальных линий струйного течения, кинематические и динамические характеристики которого нужно еще найти.

Направляющая сеть должна соответствовать или стенкам контуров, или свободным струям.

«Все умение решить задачу заключается в том, чтобы подобрать *образующую и направляющую* сети, которые удовлетворяли бы условиям данной задачи. Мы идем, однако, обратным путем: выбрав направляющую и образующую сети. Мы исследуем, какой задаче они соответствуют»

Жуковский видоизменил метод Кирхгофа, позволяющий решать задачи *при одной критической точке*, и разработал свой наглядный геометрический метод, позволяющий изучить струйное течение жидкости **при любом числе струй и критических точек**. Наиболее трудные задачи методом Кирхгофа были решены русскими учеными Д.К. Бобылевым и И.В. Мещерским, которые подробно исследовали задачу *о сопротивлении клина, помещенного в поток жидкости и газа*. Мещерский особенно детально произвел расчеты, дал таблицы для определения силы давления потока в зависимости от угла клина и от направления потока.

Н.Е. Жуковский решил своим методом не только задачи, рассмотренные указанными авторами, но и ряд новых задач. В конце своего мемуара он применяет свой метод для исследования действия турбин.

Метод Жуковского в теории струй позволяет быстро учесть физические особенности задачи, и он гораздо удобнее других методов позволяет получить конкретный численный ответ при решении практических задач. Многие из вопросов, затронутых в работе Жуковского, были впоследствии развиты как учеными нашей страны, так и за границей.

В заключение к этой работе Жуковский указывает, что «при некотором видоизменении метода возможно также решение задач об ударе беспредельного потока на тела, ограниченные кривыми контурами, и об истечении жидкостей из сосудов с кривыми стенками. Мы решили несколько таких задач, но нам не удалось, несмотря на продолжительные изыскания, решить задачу об ударе беспредельного потока на круглый цилиндр. Может быть, эта задача могла быть разрешена как предельный случай задачи об ударе потока на многогранный контур, причем в пределе выходящие углы дали бы конечное значение для скорости»

Кинематика жидкого тела в ранних трудах Н.Е.Жуковского

В «Лекциях по гидродинамике» Н.Е. Жуковский писал: «...главная часть успешных динамических исследований нашего века выпала на долю гидродинамики. Если в старое время гидродинамика изгонялась из курсов теоретической механики, как недостойная этого названия, то теперь, разумеется, она должна занять видное место, являясь одной из блестящих глав механики».

В весеннем полугодии 1886 г. Жуковский читал курс гидродинамики, впервые выделенный в качестве самостоятельной дисциплины в университете. Этот курс, содержащий много нового, был опубликован в «Ученых записках Московского университета» за **1887**г.

Н.Е. Жуковским рассматривались задачи, посвященные различным инженерным проблемам прикладной механики, чрезвычайно актуальные для практики того времени. Работы Жуковского представляют не только весьма серьезный вклад в область прикладной механики, но также и эффективный метод современного университетского преподавания механико-математических дисциплин и исследований: **геометрического представления и моделирования.**

Н.Е. Жуковский своими работами исключительно плодотворно способствовал **проникновению научных методов в область чисто технических задач.**

Он, как профессор Технического училища и один из самых активных докладчиков Политехнического общества, поддерживал связь с инженерами и был в курсе разнообразных технических проблем.

В 1897-1898 гг. Жуковский был привлечён к работам по постройке нового московского водопровода, где на него было возложено руководство опытами над ударами воды в водопроводных трубах. Найденное решение задачи о гидравлическом ударе дало возможность определить место аварии водопровода, не выходя из помещения насосной станции и не дожидаясь, когда на месте разрушения трубы вода выступит на поверхность мостовой.

- В конце XIX столетия рост потребления воды в Москве поставил перед инженерами вопрос об источниках питьевой воды для Московского водопровода. По первоначальным проектам инженеры думали расширить Мытищинский водопровод, имевший источником подпочвенные воды. Н. Е. Жуковский в одной из своих работ установил *связь между барометрическим давлением атмосферы и высотой стояния уровня подпочвенных вод*. Измеряя колебания уровня подпочвенных вод и используя формулы Жуковского, оказалось возможным подсчитать максимальную емкость подпочвенных вод в районе г. Мытищи и найти предельный возможный расход воды. Расчеты показали, что имеющиеся запасы воды в районе Мытищинской водопроводной станции не смогут удовлетворить потребностей Москвы, и поэтому мысль о расширении Мытищинского водопровода была оставлена.
- Была спроектирована и построена водопроводная станция в Рублеве. После окончания постройки и пуска Рублевского водопровода начались аварии двадцатичетырехдюймовых магистральных труб. Была создана комиссия специалистов по изучению причин этого явления.

- В 1897—1898 годах по инициативе заведующего Московским водопроводом Н. П. Зимина профессор Жуковский был привлечен к этим работам и на него было возложено **руководство опытами над ударами воды в водопроводных трубах**. Опыты делались над трубами 2,4 и 6 дюймов в диаметре, положенными на поверхность земли во дворе водокачки и соединенными с главной магистралью Москвы, которая имела 24 дюйма в диаметре. *«Эти опыты дали интересные результаты, которые, насколько мне известно, до сих пор не указаны в технической литературе; оказалось, что все явления при гидравлическом ударе объясняются возникновением и распространением в трубах ударной волны, происходящей от сжатия воды и от расширения стенок трубы»*.
- *«Инженеры, которые занимались этой задачей, не обратили внимания на то, что при весьма быстром закрытии задвижки вода останавливается и давление повышается только при задвижке, и это состояние воды передается по трубе по закону распространения волнообразного движения. Я полагаю, что упомянутое 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»*.

- Для понимания сути явления гидравлического удара можно привести следующие пояснения. Представим себе длинную цилиндрическую трубу, один конец которой открыт. Пусть по этой трубе достаточно долго течет вода, так что скорости частичек зависят только от расстояния от стенки. Как показывает опыт, скорости частичек воды в любом сечении трубы почти одинаковы, за исключением тонкого слоя около самой стенки, где благодаря трению жидкость подтормаживается. Можно поэтому представить, что в трубе с некоторой скоростью движется длинный жидкий стержень. Если конец трубы, где выливается вода, быстро закрыть, то получается удар водяного столба о задвижку, аналогичный удару упругого стержня по плите. В месте закрытия (у задвижки) давление резко повышается, и это повышенное давление бежит от задвижки по трубе по законам, аналогичным законам распространения звука в воздухе. Так как при больших давлениях в трубе стенки трубы расширяются и поперечное сечение трубы увеличивается, то закон распространения повышенного давления при разной толщине стенок труб будет несколько изменяться.

Выяснив основные физические факторы явления (**доминирующие факторы**, как любил говорить Жуковский), Николай Егорович составляет уравнения, связывающие четыре функции: **скорость течения, давление, плотность и радиус трубы**, зависящие от времени и расстояния рассматриваемого сечения от **выбранного начала координат**. Строгое математическое решение полученных уравнений привело Жуковского к следующим основным результатам:

«1. Гидравлический удар распространяется вдоль водопроводной трубы с постоянной скоростью, величина которой не зависит заметно 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, а для труб больших диаметров (24 дюйма) — около 470 сажен в секунду. Скорость ударной волны остается одна и та же, получается ли удар вследствие остановки течения воды в трубе или вследствие весьма быстрого поднятия давления при начале трубы.

- 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. Для обыкновенных чугунных труб среднего диаметра на каждый фут потерянной скорости мы имеем силу удара около четырех атмосфер.
- 3.** Опасное возрастание ударного давления происходит при переходе ударной волны с труб большого диаметра на трубы малого диаметра. При этом, достигнув концов тупиков, сила ударного давления удваивается. Такое удвоение может повториться несколько раз так, что давление может при неблагоприятных условиях возрасти до большого предела.
- 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 ударную волну, если они поставлены на линии трубы, но сохранение воздуха в колпаках весьма затруднительно».

- Теоретические выводы, вытекающие из решений уравнений Жуковского, были подтверждены опытами на специальной установке при Алексеевской водокачке Московского водопровода.
- Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования Жуковского вполне разъяснили сложное явление **гидравлического удара в трубах**. Формулы Жуковского вот уже много лет являются основными при расчетах такого рода.
- Николай Егорович выступал несколько раз с **докладами** о полученных им фундаментальных результатах по гидравлическому удару в водопроводных трубах. Особенный успех имел доклад Жуковского на собрании ученых и инженеров в **Политехническом обществе** 21 февраля 1898 года. В воспоминаниях профессора, инженера П. К. Худякова мы можем прочесть: *«Когда Николай Егорович делал об этой работе свой доклад в Политехническом обществе, это был для него день колоссального триумфа, а для всей нашей семьи инженеров это был день живой, необычайной радости, вызванной успехами нашего любимого учителя. Чутье подсказывало тогда всем нам, ученикам Николая Егоровича, что эта его работа будет иметь злободневное и безусловное мировое значение»*. Так и оказалось. Весьма скоро работа Н. Е. Жуковского «О гидравлическом ударе в водопроводных трубах» была переведена на немецкий язык (1900), а затем на английский (1904) и, наконец, на французский (1907).

- Политехническое общество и Московское высшее техническое училище (МВТУ), безусловно, способствовали привлечению Николая Егоровича к чисто инженерным, жизнью выдвигаемым вопросам. Несколько позднее инженерная общественность Москвы провозгласила, что Жуковский является **инженером самого высшего ранга**. «По силе, по глубине и напряженности своего инженерного творчества он значительно превосходит любого из так называемых выдающихся инженеров, известных нам», — пишет профессор Худяков.
- В 1911 году, к 40-летию профессорской деятельности, Московское высшее техническое училище преподнесло Н. Е. Жуковскому звание **инженер-механик**, «чести ради» — как говорят ученые, и золотой инженерный знак. Николай Егорович весьма охотно носил это украшение, совершенно исключавшееся для прежних профессоров механики, работавших в стиле чисто математическом.

- Заметим, что решение задачи о гидравлическом ударе дает возможность определить **место аварии водопровода**, не выходя из помещения насосной станции и не дожидаясь того, когда на месте разрушения трубы вода выступит на поверхность мостовой.

Для этого на станции производят легкий гидравлический удар, снимают индикаторную диаграмму гидравлических давлений, обнаруживают на ней падение кривой давления, и эти исходные экспериментальные данные вместе с формулами Жуковского позволяют полностью решить задачу.

- Даже при недостаточно совершенной измерительной аппаратуре, которой пользовались в XIX столетии, опытная проверка дала хорошее согласие теории Жуковского с опытными данными. Была взята двухдюймовая труба длиной 356,3 сажени. В этой трубе были искусственно сделаны дыры на разных расстояниях от задвижки. Места утечки определялись по диаграмме давлений и формулам Жуковского и сравнивались с фактическими расстояниями. Результаты пяти опытов приведены в следующей таблице.
- Результаты опытов Н. Е. Жуковского по определению места утечки воды в трубе, проведенных 25 сентября 1897 года.

«По ударной диаграмме, снятой с водопроводной трубы,— пишет Жуковский, — можно определить **место скопления воздушных масс в трубе и величину этих масс**. Ударная диаграмма может служить **для определения места утечки воды в трубе и вообще дать полные сведения о состоянии трубы**».

№ опыта	№ дыры в трубе	Скорость воды (в футах)	Теоретическое расстояние фонтана от задвижки, определенное по формулам Н. Е. Жуковского (в саженях)	Действительное расстояние от задвижки (в саженях)
1	3	3,92	60	56,5
2	4а	3,86	75	76,9
3	4а	4,18	78	76,9
4	6	3,61	138	135,6
5	6	3,60	132	135,6

- Выдающиеся научные заслуги Николая Егоровича были отмечены в 1894 году избранием его в **члены-корреспонденты Академии наук**. В 1900 году Жуковский был выдвинут в действительные члены Академии. По условиям того времени выборы в действительные члены Академии требовали переезда в Петербург. Не желая покидать Москву, где Жуковский был научным руководителем и признанным главой большой школы механиков, Николай Егорович снял свою кандидатуру.
- К 1900 году Жуковский опубликовал в различных изданиях 86 научных работ о самых разнообразных вопросах теоретической и прикладной механики. Эти работы получили всеобщее признание в научных кругах и создали ему уважение и авторитет у многочисленных учеников.

От вопросов чисто теоретических, которым посвящена, например, его диссертация, Николай Егорович постепенно переходит к вопросам, которые ставила современная техника.

Так, его классическая работа **«О гидравлическом ударе в водопроводных трубах»**, переведенная на немецкий, английский и французский языки, выдвинула Жуковского на первое место среди теоретиков-механиков, работавших в области гидравлики

В наши дни всеобщего увлечения (и даже преклонения) перед методами высшей математики (дифференциальные уравнения, теория вероятностей, вариационное исчисление и др.) хотелось бы остановиться сначала на оценках роли математики при исследовании проблем механики. Величие Жуковского состояло в его удивительной способности схватывать самую суть механической проблемы и делать ее геометрически столь ясной, что последующий математический формализм не скрывал физической сущности явлений под математическими одеждами.