

УДК 532

Из истории механики жидкости и газа XVII–XIX веков

В. И. Яковлев

Пермский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15
iakovlev@psu.ru; 8(342) 239 62 98

Приводится краткая история развития основных идей, законов и методов гидромеханики до XX века.

Ключевые слова: гидростатика; законы механики; гидродинамика; О. Коши; Г. Гельмгольц.

DOI: 10.17072/1993-0550-2018-1-74-82

Начальный этап

Многие столетия центрами внимания изобретателей и философов были твердые тела (камни, обожженная глина, дерево для постройки жилищ, плательных средств), каменные, деревянные, металлические инструменты и механизмы, предназначенные для выполнения конкретных видов работ.

Чтобы сделать лук, научиться далеко и метко стрелять, нужно было понимание принципов его деятельности и причин движения стрел в воздушной среде. Для постройки и эксплуатации каналов, акведуков, лодок, плотов, парусных судов, разнообразных мельниц, пневматических механизмов ("Пневматика" Герона) были необходимы знания законов гидростатики, движения воды и воздуха по трубам, величин сил сопротивления воды, давления ветра на парус, на лопасти мельниц определенной формы. После XV в. в связи с бурным развитием кораблестроения (в эпоху Великих географических открытий), артиллерии, эти проблемы приобретают первостепенное значение, и к ним еще добавляются задачи внешней и внутренней баллистики.

Первоначально необходимые теоретические сведения (экспериментально открытые законы) касались конкретных технических устройств и способов их эксплуатации. Они

содержались в трактатах, посвященных описанию устройства и правил эксплуатации технических приспособлений. Со временем некоторые из теоретических выводов, получившие практическое подтверждение, получили статус общих законов и излагались уже в трактатах естественнонаучного, математического и философского содержания.

Одним из первых был закон, сформулированный Архимедом. Закон утверждал, что всякое тело, погруженное в воду, выталкивается из нее с силой, равной весу вытесненной воды. Важно отметить, что объектом внимания ученого стало не только тело, но и среда, в которой оно находится. Постепенно жидкости и газы стали привлекать внимание исследователей не только в качестве среды обитания твердых тел, но и как самостоятельные объекты исследования. Почему вода в реке течет, а в озере или пруду нет? Как влияет сопротивление воды на движение лодки? Как использовать силу ветра для управления парусным судном, ветряной мельницей? Эти и многие другие вопросы возникали у древних и средневековых ученых, строителей гидротехнических сооружений (каналов, плотин, водопроводов), насосов, водяных часов, сифонов, многочисленных пневматических устройств, больших и малых парусных и вёсельных судов.

Известный механик, математик и строитель гидротехнических сооружений Симон Стевин в конце XVI в. сформулировал принцип отвердевания жидкости, согласно кото-

рому давление на поверхности мысленно выделенного в жидкости "сосуда" не зависит от того, является ли "сосуд" жидким или твердым. Этот принцип позволил Стевину обосновать закон сообщающихся сосудов, закон Архимеда, и рассчитывать давление воды на боковые стенки и на дно сосуда произвольной формы.

Важную роль в понимании физической природы сплошной среды, в частности жидкости, сыграли идеи Галилея, изложенные им в работах "Рассуждения о телах, пребывающих в воде" (1612) и "Беседах и математических доказательствах, касающихся двух новых отраслей науки" (1638). В представлениях Галилея, изложенных в первой их публикаций, жидкость – это "агрегат частиц, не связанных, а только прилегающих друг к другу". "В жидкой среде, в воздухе, воде и других жидкостях, нет противодействия разделению (частиц), но все они малейшей силой разделяются и проникаются". Эти частички очень мелкие, в пределе это тела-точки, плотно заполняющие некоторое пространство.

В первой половине XVII в. Паскаль сформулировал еще один важный закон гидростатики: давление на некоторую площадку, погруженную в жидкость, не зависит от ее ориентации в данной точке. Впервые закон был опубликован в 1663 г. Позднее он использовался и для двигающихся жидкостей. Торричелли, применяя закон падающих тел (Галилея), установил скорость воды, вытекающей из отверстия у дна сосуда ($v^2 = 2gh$, где h – высота сосуда), показал, что вытекающая из отверстия струя должна двигаться по параболе, доказал существование атмосферного давления и изобрел первый барометр (прибор для измерения атмосферного давления).

Французский физик Эдм Мариотт (1620–1684) в 1676–1681 опубликовал трактат "Очерки по физике", в котором, в частности, рассматривал движение жидкостей и газов.

В 1679 г. он сформулировал закон о зависимости между объемом и давлением газа в сосуде (закон Бойля–Мариотта). Позднее выяснилось, что на 17 лет раньше этот результат был получен англичанином Робертом Бойлем (1627–1691). Поэтому в механику он вошел как "закон Бойля–Мариотта": при неизменных температуре и массе идеального газа, произведение давления газа на его объем постоянно.

Гидромеханика в XVIII веке

Законы Архимеда, Паскаля и Торричелли долгие годы составляли основу механики покоящейся жидкости – гидростатики. Но в XVII в. появились задачи, связанные с изучением не только равновесия и не только воды, но и движения произвольных жидкостей. Например, движение крови по сосудам в организмах животных и человека. Второй важной задачей оказался вопрос о происхождении и форме нашей планеты. Он не был праздным. По гипотезе, ставшей тогда популярной, планета Земля произошла от вращающейся вокруг ее оси жидкой массы, окружающей твердое ядро. Поэтому возникли тревожные, будоражившие умы многих, в том числе и далеких от науки людей, вопросы о возможности конца света по причине разрушения Земли, вследствие ее вращения вокруг своей оси (о поведении некоего жидкого эллипсоида вращения).

Размышляя о вращении жидкого эллипсоида, Гюйгенс пришел к выводу, что равнодействующая гравитационных и центробежных сил в каждой точке будет перпендикулярна поверхности вращающейся жидкой массы. Это позволило задать вопрос о форме нашей планеты. Ньютон в третьей книге своих "Начал" использовал свой принцип равенства центральных "столбов" жидкости: если один "столб" направлен по оси вращения планеты, а другой "столб" – по радиусу плоскости экватора, то они пересекаются в центре Земли и их действие уравнивается. В начале XVIII в. ответ на вопрос о форме Земли и ее устойчивости попытались дать К. Маклорен (установил устойчивость сплюснутого у полюсов эллипсоида вращения) и А. Клеро.

В трактате "Теория фигуры Земли, основанная на началах гидростатики" (1743) Клеро вместо двух ньютоновых "столбов" рассматривал каналы произвольной формы, выделенные внутри жидкости. Суть его принципа была созвучна идеям Гюйгенса и Ньютона. Она сводилась к тому, что равновесие в канале (и во всем вращающемся жидком теле) возможно только при уравнивании усилий во всех частях жидкого канала. Записав это условие в виде уравнения, Клеро сделал первый шаг в математизацию гидростатики и установил устойчивость вращающегося жидкого эллипсоида (под которым подразумевалась Земля). Понятие "усилия" Эйлер позднее заменил понятием "давление жидкости".

И тогда принцип Клеро получил новую формулировку: разность давлений, взятая по всему ходу канала, должна быть равна нулю. В разные годы к этим проблемам обращались Ж.Л. Даламбер, Л. Эйлер, П.С. Лаплас, А.М. Лежандр, С.Д. Пуассон и другие ученые.

В XVIII в. начинается эра воздухоплавания. В 1709 г. бразилец, переехавший в Лиссабон (Португалия), Бартоломеу Лоуранс де Гусман (1685–1724) получил патент на изобретение "воздушного корабля" – бумажного шара, наполненного горячим воздухом. В 1709 г. (08 августа) он продемонстрировал португальскому королю полет этого шара. Далее идею создания воздушного шара подхватили французы – братья Монгольфье: Жозеф-Мишель (1740–1810) и Жак-Этьен (1745–1799). В 1783 г. они изготовили воздушный шар (из холста, оклеенного изнутри бумагой), наполняемый горячим воздухом ("монгольфьер"). В первый полет (5 июня 1783 г.) шар пролетел за 10 минут на высоте 500 метров около 2 километров. Второй полет (19 сентября 1783 г.) проходил в присутствии короля Людовика XVI. Первыми пассажирами шара были овца, курица и утка, которые за те же 10 минут благополучно пролетели около 4 километров. Третий (первый пилотируемый!) полет состоялся в Париже 21 ноября 1783 г. За 25 минут полета на высоте около километра Пилатр де Розье и маркиз Дарланд перелетели через Сену и пролетели на монгольфьере около 9 километров.

В том же году воздушный шар, наполненный водородом ("шарльер"), был создан французским инженером Жаком Шарлем (G.A.C. Charles, 1746–1823). 27 августа 1783 г. этот шар совершил первый полет над Парижем, а 1 декабря 1783 г. Жак Шарль и инженер Николя-Луи Робер совершили пилотируемый полет. Шарль был не только конструктором, но и ученым. В механику газа вошел "закон Шарля": при постоянном объеме, давление идеального газа прямо пропорционально его абсолютной температуре (1787). Еще ранее (в конце XVII в.) качественно этот закон был сформулирован Г. Амонтоном, а в 1801 г. его переоткрыл англичанин Джон Дальтон (1766–1844). В 1802 г. француз Жозеф Луи Гей-Люссак (1778–1850) впервые опубликовал этот закон.

Начало эры воздухоплавания стало важным стимулом для дальнейшего изучения

движения летательных аппаратов и развития гидродинамики.

В первой половине XVIII в. представления Галилея и других атомистов о свойствах сплошной среды трансформировались. Впервые, изучение поведения множества дискретных частиц-шариков было заменено изучением поведения мысленно выделенных жидких объемов сплошной среды, жидких элементов. И. Бернулли, Д. Бернулли, Л. Эйлер, Ж.Л. Даламбер и их последователи в качестве жидких объемов рассматривали не конечные элементы (тела – частицы), а абстрактные математические объекты – стягивающиеся в точку бесконечно малые объемы жидкости (элементарные кубики, параллелепипеды, тетраэдры, ...). Этот переход к бесконечно малым объемам открыл путь к использованию анализа бесконечно малых для построения не только теоретической (математической) гидродинамики, но и всей механики сплошных сред.

Вторым важным достижением стало формирование понятия внутреннего давления среды. Со времен Архимеда под этим понималось вертикальное давление, которое отождествлялось с весом жидкой массы. Опыты с жидкостями в сосудах, теоретические рассуждения С. Стевина ("Начала гидростатики", 1586), Б. Паскаля ("Трактат о равновесии жидкостей", 1663), И. Ньютона ("Математические начала ...", 1687) привели к установлению изотропных свойств внутреннего давления в каждой точке покоящейся жидкости (газа), сформулированных законом Паскаля. Через полвека Д. Бернулли распространил этот закон на движущуюся сплошную среду, а далее Л. Эйлер выразил понятие внутреннего давления скалярной функцией координат геометрической точки (точки пространства, занятой жидкостью) и времени, превратив его в характеристику распределения давлений в пространстве (поле давлений) и времени. Эта идея оказалась исходной для появления других важнейших понятий поля (поля сил, поля скоростей, поля температур, ...), потенциальной функции (потенциала) и формирования общей теории поля в работах ученых XIX в.

Изучению свойств и движений жидкостей и газов посвящена вторая книга "Начал" Ньютона. Автор предлагает целый ряд новых понятий, задач и теорий, связанных с описанием и использованием упругости воздуха, вытекания жидкости из отверстия в сосуде,

движения волн в воде, колебаний воды в трубе, сопротивления телам при их движении в разреженных или плотных средах, распространения звука в воздухе, внутреннего трения жидкостей. Многие результаты этой книги не получили дальнейшего развития, но привлекли внимание многочисленных последователей Ньютона. Как писал К. Трусделл, "Блестяще искренняя, но, в конце концов, полностью неудовлетворительная Книга II спланировала области и определила задачи для многих исследований в области механики следующего века" [4, с. 121].

В 1738 г. Даниил Бернулли опубликовал в Страсбурге уже упоминавшийся обширный (более 400 страниц) трактат "Гидродинамика или записки о силах и движениях жидкости". После этого издания механика пополнилась термином "гидродинамика", под которым автор понимал совокупность гидростатики и гидравлики (науки о движении жидкости в каналах и трубах). В книге описывается простейшая модель идеальной жидкости (все частицы в поперечном сечении трубы имеют одинаковую скорость – "гипотеза параллельных сечений"), закладываются основы кинетической теории газов, а для решения разнообразных задач гидростатики, гидравлики, внутренней баллистики используется закон сохранения живых сил. Здесь же решается задача об определении давления p в некотором сечении трубы, по которой со скоростью v движется установившийся поток несжимаемой жидкости постоянной плотности ρ . Полученное автором уравнение (в современной интерпретации):

$$\frac{1}{2}v^2 + \frac{\rho}{\rho} + g h = \text{const},$$

где g – ускорение силы тяжести, h – высота относительно горизонтальной плоскости, ныне известное как "уравнение или интеграл Бернулли", выражает закон сохранения живых сил (кинетической и потенциальной энергии) и позволяет решать многие задачи гидротехники и динамики газов. Многие идеи и задачи "Гидродинамики" далее развивались в трудах И. Бернулли, Ж.Л. Даламбера, Л. Эйлера, Ж.Л. Лагранжа и их современников.

Через 5 лет Иоганн Бернулли издал трактат "Гидравлика, впервые открытая и доказанная на чисто механических основаниях" (1743). Ему нужно было вернуть статус самого знаменитого геометра Европы, неофициально полученный после смерти Ньютона и

пошатнувшийся после выхода "Гидродинамики" его сына. Здесь автор развивает и усложняет некоторые задачи "Гидродинамики", использует новые подходы и методы их решения. В частности, он пытается разделить задачи кинематики и динамики течения жидкости, вводит понятие внутренней силы, действующей в поперечном сечении трубки, получает "уравнение Бернулли" (по аналогии с решением задачи о "цепной линии", где роль давления в трубке жидкости играло натяжение в гибкой нити). Этой идеей аналогии дальше воспользовался и Эйлер при решении некоторых инженерных задач (о помпах, водяных колесах, тепловой конвекции и других).

Через год после выхода трактата И. Бернулли Даламбер опубликовал "Трактат о равновесии движения жидкостей" (1744). Как и в своей "Динамике", автор предлагал избегать понятия силы, пытался сводить задачи гидродинамики к гидростатике, недостаточно ясно выражал свои идеи (начиная с названия книги), однако привел корректные дифференциальные уравнения в частных производных для осесимметричных и плоских безвихревых движений жидкости (основываясь на уравнениях равновесия идеальной жидкости в частных производных, полученных Клеро), ввел понятие комплексной скорости (как функции комплексной координаты точки плоского безвихревого течения) несжимаемой жидкости, установил отсутствие сопротивления телу, движущемуся равномерно и прямолинейно в покоящейся идеальной жидкости ("парадокс Даламбера" по терминологии Эйлера). Продолжением этой тематики стал "Очерк об общей природе ветров" (1746), за который Даламбер получил награду Берлинской академии наук. В 1750 г. он вновь претендовал на награду за "Очерк о новой теории сопротивления жидкостей". И хотя Д. Бернулли критически отнесся к новым сочинениям конкурента, и в премии было отказано, в 1752 г. эта книга была опубликована.

Интерес Эйлера к задачам гидродинамики возник еще в Базеле, а далее он получил развитие (под влиянием Даниила Бернулли) после его переселения в Петербург. Однако первые публикации Эйлера появились значительно позднее, в берлинский период его жизни. Сначала это были публичные отклики на статьи и книги Иоганна и Даниила Бернулли, Даламбера, решение (по поручению Петербургской академии наук) конкретных за-

дач, связанных с конструкцией кораблей, их управляемости, устойчивости, задач из области баллистики (движение снаряда с учетом сопротивления среды). Эйлер участвовал в консультировании строительства каналов в Пруссии, описании устройства реактивных гидравлических машин (например, "сегнерова колеса").

Этим проблемам посвящена его переписка с многочисленными коллегами, а также большие трактаты: "Морская наука" (1743), "Новые принципы артиллерии, содержащие определение силы пороха вместе с исследованием различия в сопротивлении воздуха при быстрых и медленных движениях" (1748), "Принципы движения жидкостей" (1752), "Общие начала состояния равновесия жидкостей", "Общие начала движения жидкостей", "Продолжение исследований по теории движения жидкостей" (1753–1755), "Более полная теория машин, приводимых в движение реакцией воды" (1754), "Начала движения жидкостей" (1756–1757), "О принципах движения жидкости" (1770).

В качестве математического аппарата для описания свойств, равновесия и движения жидкости использовались уравнения в частных производных. Это был тогда новый вид дифференциальных уравнений, и Эйлер впервые дал описание некоторых их типов, а также сформулировал методы их интегрирования. Эйлеру принадлежит один из первых выводов уравнения неразрывности (сплошности) жидкости (1752):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

(где x, y, z – координаты частицы в неподвижной системе отсчета ("эйлеровы координаты"), а u, v, w – компоненты скорости в той же системе координат), вывод основной системы дифференциальных уравнений движения идеальной жидкости и многие другие основополагающие результаты. Вывод уравнений движения был основан на использовании теоремы об изменении количества движения точки применительно к жидким и газообразным средам. Точнее – к изменению количества движения ($m\mathbf{v}$) элементарного объема $dx dy dz$ жидкости или твердого тела.

Следует отметить, что, начиная с "Начал" Ньютона и "Гидродинамики" Д. Бернулли, установилась специфика математической постановки задач гидромеханики в виде системы двух уравнений (неразрывности и дви-

жения). После публикаций И. Бернулли в качестве уравнений движения стали использовать не только его уравнения и уравнения Торричелли, но чаще использовались уравнения, выражающие либо второй закон Ньютона, либо закон сохранения живых сил Лейбница. А уравнения неразрывности записывались не так, как это делали Ньютон, Д. Бернулли, Клеро (в виде конечных формул), а в виде дифференциального уравнения. Впервые они были получены Даламбером и Эйлером независимо друг от друга, у каждого в своем виде, почти одновременно и опубликованы в 1752 г.

Более точные уравнения движения (в проекциях на координатные оси), уравнение неразрывности и уравнение, связывающее давление, плотность и температуру, были опубликованы Эйлером в 1757 г. ("Общие принципы движения жидкостей"). Таким образом, Эйлером и Даламбером было положено начало аналитической механике сплошной среды. Следует добавить, что в работе 1754 г. Эйлер впервые использовал ускорение, которое Г. Кориолис ввел только в 1831 г., а в его (Эйлера) работах по математическому моделированию водометных двигателей, опубликованных в 1753–1771 гг., впервые получены уравнения движения, учитывающие переменность массы тела.

В трактате 1770 г. Эйлер опубликовал новый вид уравнений движения жидкости, далее получивших название "уравнений движения в форме Лагранжа". Новый вид уравнений был следствием иного подхода к изучению движения жидкости, основанного на представлении жидкости в виде множества траекторий элементарного объема жидкости (по аналогии с движением точки по ее траектории).

Важную роль в формировании теоретической гидромеханики играли экспериментальные исследования. Наглядным примером развития экспериментальной гидромеханики были работы по исследованию сопротивления движению судов, проводимые во Франции Ш. Боссю (1730–1814), М.Ж.А.Н. Кондорсе (1743–1794) и Ж.Л. Даламбером в экспериментальном бассейне Мезьерской военно-инженерной школы в 1775–1777 гг. Целью проводимых опытов была проверка гипотез Ньютона, установление истинных причин сопротивления воды движению судов (в открытых водоемах и закрытых каналах) в зависи-

мости от их формы, определение численных коэффициентов сопротивления движению. Итоги исследований докладывались на заседаниях Парижской академии наук и были опубликованы ("Новые исследования сопротивления жидкости", Париж, 1777).

Дальнейшее развитие гидромеханики идеальной жидкости, подведение итогов ее развития в XVIII в. связано с именем Лагранжа. В "Аналитической механике" приводится исторический обзор принципов гидростатики, анализ результатов предшественников и современников. Особо выделяя заслуги Даламбера и Эйлера (первенство Даламбера и ясное изложение результатов Эйлером), Лагранж приводит новую форму уравнений движения и условий несжимаемости жидкости (на основе принципа Даламбера, принципа виртуальных скоростей (перемещений) и в предположении параллельности слоев жидкости), получает уравнения для волн в канале (неглубоком бассейне).

Первые результаты приближенной теории длинных волн на поверхности тяжелой жидкости (уравнение распространения волн, формула скорости их распространения, носящие сейчас его имя) были получены Лагранжем в 1781 г. Теория волнового движения потребовалась для решения задач, связанных с изучением качки, сопротивления движению корабля на волнении, приливных волн в каналах и реках. П.С. Лаплас разработал теорию волн на поверхности жидкости, изучал приливо-отливные движения и вопросы капиллярности.

Гидродинамические идеи и теории XIX века

В 1815–1816 гг. Коши и Пуассон заложили фундамент теории волн малой амплитуды. Огюстен Луи Коши родился в год Великой французской революции (1789) в семье обеспеченного парижского адвоката. Загородный дом отца находился по соседству с имениями Лапласа и Бертолле, в гости к которым часто приезжал Лагранж. С этими соседями Огюстен был знаком с раннего детства, а они не могли не заметить его необычную одаренность. В школьные годы он получил прекрасное гуманитарное образование (изу-



чал языки, историю, литературу). В 1807 г. Огюстен блестяще окончил Парижскую Политехническую школу, в 1810 – Школу мостов и дорог и далее работал инженером на строительстве Урского канала, моста в Сен-Клу, порта в Шербурге. В 1813 г. Коши вернулся в Париж и продолжил механико-математические работы, начатые еще в Шербурге.

Первая научная публикация Огюстена была посвящена геометрии, но вскоре его внимание привлекли вопросы описания поведения жидкостей (в 1815 г. он доказал теорему Лагранжа о сохранении безвихревого течения идеальной баротропной жидкости в поле консервативных сил), а далее спектр его научных интересов непрерывно расширялся, охватив практически все важнейшие направления развития математических наук в XIX в.

Исключительно важным для него оказался 1816 г. В этом году 27-летний Огюстен получил первую премию Парижской академии наук (за теорию волн на поверхности тяжелой жидкости), по указу короля был назначен членом Парижской академии наук (на место изгнанного Г. Монжа), а также стал профессором Парижской политехнической школы и Парижского университета (Сорбонны). Однако воспринятые им от отца монархистские убеждения далее неоднократно вынуждали его менять место службы и жизни. После 1830 г. он жил в Швейцарии, Италии, Чехии, путешествовал по европейским странам (на правах воспитанника внука короля Карла X), и только в 1838 г. вновь вернулся в Париж. И все эти годы до момента смерти в 1857 г. Коши вел напряженную научную деятельность.

Его научное наследие огромно (около 800 работ!). Оно, как и творчество Л. Эйлера, не только охватывает, но стало основой большинства разделов современной математики и механики. Коши впервые дал строгое определение основных понятий математического анализа (предела, бесконечно малой величины, непрерывности функции, производной, дифференциала, интеграла, сходимости ряда, радиуса сходимости и других), в области комплексного анализа создал теорию интегральных вычетов, опубликовал фундаментальные работы по теории чисел, алгебре, геометрии, дифференциальным уравнениям (обыкновенным и в частных производных), оптике, волновой теории света и механике сплошных сред (МЖГ и МТДТ). В современ-

ных физико-математических науках хорошо известны многие понятия, формулы, теоремы, уравнения, неравенства, распределения, теории, носящие его имя.

Многие работы Коши, в частности публикации по волновой теории, получили дальнейшее развитие в творчестве его современников и последователей М.В. Остроградского (1801–1862), Дж.Б. Эри (1801–1892), Дж. Грина (G. Green, 1793–1841), Дж. Г. Стокса (1819–1903), У.Д.М. Рэнкина (1820–1872), У. Томсона (1824–1907), Дж. У. Рэлея (1842–1919), Дж. Г. Дарвина (1845–1912). Существует легенда о его негативной роли в судьбе Нильса Хенрика Абеля (1802–1829) и Эвариста Галуа (1811–1832), но хорошо известна и его поддержка молодого М.В. Остроградского. Еще при жизни он был признан выдающимся ученым, кавалером ордена "Почетного легиона", членом Лондонского королевского общества, Петербургской и других европейских академий наук. А в наши дни, наряду с другими выдающимися учеными Франции, портрет Коши помещен на Эйфелей башне в Париже.

Другой важнейшей теорией механики идеальной жидкости конца XVIII – начала XIX века стала теория вихревых движений, развивающая результаты Лагранжа, Коши и Пуассона. Создание учения о вихревом движении обычно связывают с именем известного немецкого ученого Германа Людвиг Фердинанда фон Гельмгольца (H.L.F. von Helmholtz; 1821–1894).



Гельмгольц родился в 1821 г. в Потсдаме в семье учителя гимназии. В 1742 г. он окончил медико-хирургический институт, далее служил военным врачом, занимал преподавательские должности (преподавал анатомию и физиологию) в Берлинской Академии художеств, в университетах Кёнигсберга, Бонна, Гейдельберга.

Научные интересы Гельмгольца не ограничивались вопросами физиологии. С немалым интересом он относился к проблемам физики, акустики, психологии, философии. В 1870 г. Гельмгольц был избран членом Прусской академии наук, а в 1871 г. переехал в Берлин, заняв кафедру физики, оказавшуюся

вакантной после смерти Г.Г. Магнуса (1802–1870). В 1877 г. он стал директором физического института Берлинского университета (в Шарлоттенбурге), в 1888 г. – президентом физико-технического императорского ведомства. Научная деятельность Гельмгольца получила широкое признание в Германии и многих других странах, где работали его многочисленные ученики (среди них было много и российских ученых).

В брошюре "О сохранении силы" (1847) Гельмгольц приводит обоснование закона сохранения энергии, ранее (в 1842 г.) сформулированного Юлиусом Робертом фон Майером (J. R. von Mayer; 1814–1878). В 1858 г. была опубликована работа "Об интеграле гидродинамических уравнений, соответствующих вихревому движению", в которой Кирхгоф доказал основные теоремы о движении вихрей в идеальной жидкости и привел их геометрическую интерпретацию. Дальнейшее развитие эта теория получила благодаря Густаву Кирхгофу (G. R. Kirchhoff; 1824–1887; "Лекции по математической физике", 1876), Эуженио Бельтрами (Eugenio Beltrami; 1835–1900), Вальтеру Грёбли (W. Gröbli; 1852–1903), Джозефу Томсону (J.J. Thomson; 1856–1940).

Развитие математической и экспериментальной гидродинамики, практические запросы гидравлики и гидротехники неизбежно привели к обобщению и уточнению модели идеальной жидкости, связанному с внедрением новых понятий вязкости и сжимаемости жидкости. Это явилось результатом зарождения в 20-х годах XIX в. двух новых разделов, имеющих большое значение для современной гидродинамики: динамики вязкой жидкости и газовой динамики.

Наиболее значительный вклад в основы теории движения вязкой жидкости внесли экспериментальные исследования французских ученых Пьера Купле (Couple des Tatreaux Pierre, ум. в 1744), Антуана Шези (1718–1798), Шарля Боссю, Шарля Кулона, Генри Пито (Pitot Henry, 1695–1771), а также теоретические работы Луи Мари Анри Навье (1785–1836) и английского механика и математика Джорджа Габриеля Стокса (G.G. Stokes; 1819–1903). Основываясь на результатах, опубликованных в 1821 г. Навье, а позднее Коши и Пуассоном, Стокс сформулировал закон линейной зависимости напряжений от скоростей деформации и получил оконча-

тельную форму уравнения пространственного движения вязкой жидкости (уравнение Навье–Стокса).

Практические и теоретические задачи изучения движения и сопротивления вязких жидкостей в трубах и каналах (теоретическое решение этой задачи в 1846 г. дал Стокс), задачи физики, химии нефти и других аналогичных веществ, учение о трении в машинах стимулировали дальнейшее развитие гидродинамики. Так, в 1840–1842 гг. французским физиком и врачом Жаном Луи Мари Пуазёйлем (J. L.M. Poiseuille, 1799–1869) были проведены экспериментальные исследования и получен закон движения вязкой жидкости (крови) в трубках (сосудах) очень малого диаметра (капиллярах). Годом раньше (в 1839 г.) этот закон был открыт немецким физиком

(Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen, 1797–1884), поэтому позднее он получил название "закона Хагена–Пуазёйля". В 1876–1883 гг. англичанин Осборн Рейнольдс (Osborne Reynolds; 1842–1912) экспериментально установил критерий перехода ламинарного течения жидкости в трубе круглого сечения в турбулентное.

Теоретическая и практическая газовая динамика развивались параллельно с гидродинамикой вязкой жидкости, зарождением термодинамики и акустики. В 1847 г. австрийский математик и физик Кристиан Доплер (Christian Doppler; 1803–1853) установил принципиальные особенности движения газа со сверхзвуковыми скоростями (наличие линий возмущения и ударных волн). Он также известен как автор "эффекта Доплера" (приближение источника света или звука к наблюдателю увеличивает наблюдаемую частоту колебаний, отдаление ее уменьшает), который он обосновал на основе волновой теории.

В 1852 г. немецкий ученый Генрих-Густав Магнус (Heinrich-Gustav Magnus; 1802–1870) обнаружил эффект возникновения поперечной силы ("эффект или сила Магнуса"), действующей на тело, вращающееся в набегающем на него потоке жидкости или газа.

Особенности сверхзвукового движения газа, открытые Доплером, после 1881 г. были экспериментально обнаружены и изучены австрийским физиком Эрнстом Махом (Ernst Mach, 1838–1916). Так появилось число Маха (M – отношение локальной скорости потока к местной скорости звука), определяющее гра-

ницу до- и сверхзвуковых движений тела (самолета, ракеты) в газовом потоке (или газового потока, обтекающего тело). Еще ранее этот критерий до- и сверхзвуковых движений был установлен Эйлером (в 1745 г.), а в 1868–1869 гг. им пользовался русский баллистик Н.В. Майевский (1823–1892), изучавший теорию движения артиллерийских снарядов (включая сопротивление воздуха).

Во второй половине XIX в. шотландский инженер и физик Уильям Рэнкин (William John Macquorn Rankine; 1820–1872) построил полную теорию действия паровой машины, ввел термины "**потенциальная энергия**", "адиабатический и изотермический процессы", "адиабата", заложил основы теории скачка уплотнения (1870), устанавливающей связь между давлением и плотностью газа до и после звукового барьера. Французский профессор механики Пьер-Анри Югонио (Гюгоньо, Pierre-Henri Hugoniot; 1851–1887), исследуя процессы расширения газов при стрельбе из артиллерийских орудий, в 1885 г. вывел уравнение ударной волны ("уравнение Югонио–Рынкина" или "ударная адиобата"), и получил условия на поверхности разрыва (соотношения, характеризующие ударные волны, связывающие скачки физических величин при переходе через данную поверхность).

Дальнейшее развитие теоретической и экспериментальной механики жидкостей и газов диктовалось новыми задачами астрономии, авиации, артиллерии, строительства и изучения динамики и статики новых кораблей (надводных и подводных судов), ракет, автомобилей, ветровых и гидроэлектростанций, гидротехнических сооружений XX в.

Список литературы

1. Михайлов Г.К. Механика сплошной среды (XIX в.) // История механики с конца XVIII века до середины века XX. М.: Наука, 1972. 414 с.
2. Ковалев Б.Д. Формирование эйлеровой гидродинамики // Исследования по истории механики. М.: Наука, 1983. 287 с.
3. Погребысский И.Б. От Лагранжа к Эйнштейну. М.: "Янус", 1996, 400 с.
4. Трусделл К. Очерки по истории механики. Москва–Ижевск: ИКИ, 2002. 316 с.
5. Яковлев В.И. Начала механики. Москва–Ижевск: РХД, 2005, 352 с.

From the history of fluid mechanics of 17–19th centuries

V. I. Yakovlev

Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia
iakovlev@psu.ru; 8 (342) 239 62 98

The paper provides a brief history of the development of the basic ideas, laws and methods of hydromechanics until the 20th century.

Keywords: *hydrostatics; laws of mechanics; hydrodynamics; A. Cauchy; H. Helmholtz.*