



МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Авторы: А. Н. Голубятников

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА (гидроаэромеханика), раздел механики, посвящённый изучению равновесия и движения жидких и газообразных сред, их взаимодействия между собой и с твёрдыми телами. М. ж. и г. включает в себя [гидростатику](#), [гидродинамику](#), [аэростатику](#), [аэродинамику](#), [газовую динамику](#). М. ж. и г. использует элементы [термодинамики](#), тесно связана со многими др. разделами физики и химии.

История развития

Начало применения принципов М. ж. и г. можно отнести ко времени создания первых гидротехнич. сооружений (колодцев, каналов, плотин, водяных мельниц) и плавающих транспортных средств (плотов, лодок, кораблей), которые появились ещё в доисторич. эпоху. Не сформулированные в явном виде законы М. ж. и г. использовались в таких устройствах, как весло, парус, руль. Развитие охоты и воен. дела вызвало появление летающих средств поражения (стрела, диск, бумеранг) и механизмов их метания (лук, праща). Массовое изготовление подобных устройств требовало выяснения механизма их действия и количественного описания явлений, обеспечивающих их оптимальное использование. Это привело в конечном счёте к созданию М. ж. и г. как науки.

Первым учёным, внёсшим существенный вклад в создание М. ж. и г., был [Архимед](#), который открыл осн. закон гидростатики: определил величину и направление действия выталкивающей силы. Труды Архимеда послужили основой для создания целого ряда новых гидравлич. аппаратов (поршневого насоса, сифона, водоподъёмного винта и др.).

Следующий значит. этап развития М. ж. и г. начался в эпоху Возрождения. Первые науч. идеи в области аэродинамики связывают с именем [Леонардо да Винчи](#).

Наблюдая за полётом птиц, он разделил силу, действующую на движущееся в воздухе тело, на две составляющие: силу сопротивления и подъёмную силу. Леонардо да Винчи качественно связал эти силы с уплотнением воздуха перед крылом и под ним, описал два типа полётов (машущий и планирующий). Он также разрабатывал идеи летат. аппаратов.

В 16–17 вв. гидростатика Архимеда получила развитие в работах С. [Стевина](#) (принцип отвердевания для изучения условия равновесия тяжёлой жидкости, 1586), Г. [Галилея](#) (закон равных моментов сил как условие равновесия плавающего тела) и Б. [Паскаля](#) (закон изменения статич. давления в жидкостях и газах, опубл. в 1663; принцип действия гидравлич. пресса). Галилей изучал также движение тела в среде и, исследуя колебания маятников, установил линейную зависимость силы сопротивления среды от скорости. Х. [Гюйгенс](#) установил более точную (квадратичную) зависимость этой силы от величины скорости (коэффициенты в этой зависимости в технич. приложениях определяются экспериментально).

И. [Ньютон](#) считал причиной возникновения подъёмной силы и силы сопротивления удары частиц воздуха о лобовую часть тела. Он также ввёл понятие силы трения, связанной с относит. движением воздуха вдоль поверхности тела. С совр. точки зрения моделирование обтекания тела по Ньютону соответствует гиперзвуковому течению газа. Установив законы механики дискретных систем материальных точек, Ньютон открыл путь для математич. моделирования движения жидкостей и газов, рассматриваемых как континуум, или сплошная среда (см. [Механика сплошной среды](#)).

В 18 в. работы по гидростатике были дополнены трудами Л. [Эйлера](#), в результате чего появилась теория гидростатич. устойчивости плавающего тела. Также в 18 в. заложены основы гидродинамики. Сам термин «гидродинамика» введён Д. [Бернулли](#) в 1738. Первой полной математич. моделью гидродинамики была система уравнений движения идеальной (невязкой) жидкости, выведенная Эйлером в 1755. Полученное ранее [Бернулли уравнение](#) следовало из уравнений Эйлера как интеграл при установившемся движении. Хотя модель Эйлера хорошо описывала мн. движения жидкостей и газов, она не учитывала вязкого трения между слоями жидкости, что приводило к отсутствию силы, действующей на тело при безотрывном стационарном

обтекании ([Эйлера – Д’Аламбера парадокс](#)).

Модель вязкой жидкости, обобщающая уравнения Эйлера, предложена в 1821 Л. [Навье](#) и исследована Дж. [Стоксом](#) (см. [Навье – Стокса уравнения](#)). При описании процесса распространения звука (напр., при создании муз. инструментов) необходимо было учитывать также сжимаемость среды. С созданием устройств, работающих на силе сжатого газа (арт. орудия, ружья, паровые машины и турбины), в рамках М. ж. и г. начали рассматривать и тепловые нелинейные явления. Задача о разгоне снаряда в стволе, решённая Ж. [Лагранжем](#) на рубеже 18–19 вв., стала первой типичной задачей газовой динамики. Исследование нелинейных уравнений одномерных волновых движений идеального газа провёл Б. [Риман](#), который указал на возникновение [ударных волн](#) как на типичное явление. Возникновение ударных волн при движении снаряда со сверхзвуковой скоростью экспериментально обнаружил Э. [Мах](#) (1881).

Аэродинамика получила значит. развитие только в нач. 20 в. благодаря работам Н. Е. [Жуковского](#) и С. А. [Чаплыгина](#). Им удалось правильно понять природу подъёмной силы крыла самолёта и эффективно вычислить (в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости) эту силу, а также силу тяги лопасти винта, что дало существенный толчок к развитию дозвуковой авиации и созданию быстроходных судов.

Математические модели

Первой простейшей гидродинамич. моделью является система уравнений, состоящая из уравнений движения идеальной (невязкой) жидкости и уравнения неразрывности:

$$\frac{dv_i}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} = F_i, \quad \frac{d\rho}{dt} + \rho \sum_{i=1}^3 \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

где полная производная $d/dt = \partial/\partial t + \sum_{i=1}^3 v_i \partial/\partial x_i$, x_i – декартовы пространственные координаты ($i = 1, 2, 3$), t – время, v_i – компоненты скорости среды; F_i – сила, рассчитанная на единицу массы, ρ – плотность жидкости, p – давление. Эта система уравнений выведена Л. Эйлером на основании законов Ньютона, Паскаля и закона сохранения массы.

Для того чтобы система уравнений (1) была замкнутой, необходимо привлечь законы термодинамики или к.-л. дополнит. условия, связывающие плотность и давление.

Напр., плотность однородной несжимаемой жидкости постоянна, и второе уравнение даёт условие сохранения объёма жидкой частицы при движении: $\sum_{j=1}^3 \partial v_j / \partial x_j = 0$. Если при этом сила имеет потенциал U (т. е. $F_j = \partial U / \partial x_j$), то при установившемся движении среды интеграл уравнений Эйлера вдоль линии тока приобретает вид $v^2/2 + p/\rho - U = const$, называемый уравнением Бернулли. Если под F понимать силу тяжести, то уравнение принимает вид $v^2/2 + p/\rho + gz = const$ (здесь z – вертикальная координата).

При адиабатич. движении жидкости (т. е. без притока тепла и в отсутствие диссипации энергии, обусловленной вязкостью) в данной модели считается верным следующее условие:

$$\frac{dp}{dt} = a^2(\rho, p) \frac{d\rho}{dt},$$

где a – характеристика среды (скорость звука), заданная как функция плотности и давления.

Важным вопросом интегрирования уравнений Эйлера является установление условий, при которых скорость может быть выражена через потенциал $\phi(x, t): v_j = \partial \phi / \partial x_j$. В этом случае задача сводится к определению только одной функции $\phi(x, t)$. Для несжимаемой жидкости потенциал ϕ удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_i^2} = 0$$

Тогда для давления справедлива следующая формула:

$$p = f(t) - \rho(\partial \phi / \partial t + v^2/2 - U),$$

где $f(t)$ – произвольная функция времени. Краевыми условиями для ϕ в задачах обтекания тел служат равенство нормальных составляющих скоростей жидкости и тела, а также, напр., условие постоянства скорости на бесконечности. Если же часть границы жидкости является свободной поверхностью, на которой задано давление,

то задача становится нелинейной.

При рассмотрении распространения звука как совокупности малых возмущений в покое газе с постоянными давлением p_0 и плотностью ρ_0 (при условии пренебрежения силой тяжести) после линеаризации уравнений Эйлера получается волновое уравнение:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - a_0^2 \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} = 0, \quad p = p_0 - \rho_0 \frac{\partial \varphi}{\partial t}.$$

Это уравнение в некотором приближении может быть использовано в задачах о движении тонких тел (стрел, пуль, крыльев, фюзеляжей самолётов, ракет и т. п.) как в дозвуковом, так и сверхзвуковом режиме.

Модель Навье – Стокса, помимо давления, учитывает внутр. вязкие напряжения, линейно зависящие от скоростей деформации жидкой частицы. Вязкие напряжения могут быть разбиты на объёмную и сдвиговую составляющие. Обычно объёмной вязкостью для жидкостей и газов можно пренебречь. В результате при постоянном коэф. вязкости μ получается уравнение:

$$\rho \frac{dv_j}{dt} + \frac{\partial p}{\partial x_j} = \mu \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial^2 v_j}{\partial x_i^2} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 v_j}{\partial x_i \partial x_j} \right) + \rho F_j. \quad (2)$$

При этом краевое условие на поверхности тела меняется на условие непрерывности всех компонент скорости.

Если жидкость несжимаема, то вме-сте с условием $\sum_{j=1}^3 \partial v_j / \partial x_j = 0$ уравнения (2) достаточно для решения мн. задач обтекания тел. Для сжимаемых жидкостей и газов необходимо также привлечение уравнения притока тепла с учётом теплопроводности и диссипации энергии, обусловленной вязкостью среды, в некоторых случаях – с учётом химич. реакций и излучения нагретого газа.

Для сопоставления применимости перечисленных моделей М. ж. и г., в частности при стационарном характере течения, вводятся два безразмерных параметра: Рейнольдса число $Re = \rho V l / \mu$ и Маха число $M = V / a$, где l – характерный размер тела или сосуда, V

– характерная скорость потока. При постановке экспериментов физич. моделирования эти величины должны совпадать с их натурными значениями.

Модель несжимаемой жидкости применима при малых числах M . В этом случае при малых значениях Re вязкость существенна во всём потоке, причём нелинейными членами в уравнениях можно пренебречь (приближение Стокса). Такие течения рассматривает, в частности, микродинамика. При умеренно больших числах Re вязкость существенна только вблизи поверхности тела (приближение пограничного слоя Прандтля) или в тонких слоях сдвига, разделяющих зоны отрывных течений; вне этих слоёв течение, как правило, потенциальное (безвихревое) или равнозавихренное. В этих режимах осуществляется ламинарное течение. При больших значениях Re (для течений в трубах ок. 2300) ламинарное течение теряет устойчивость и превращается в турбулентное течение.

Для описания осреднённых характеристик течения О. Рейнольдс ввёл внутр. турбулентные напряжения, для определения которых требуются дополнит. построения. Одно из них – теория пути перемешивания Прандтля, основанная на аналогии с теорией молекулярного движения газа. В целом проблема эффективного расчёта турбулентных течений пока остаётся открытой.

С ростом M влияние сжимаемости возрастает. При M порядка единицы и более в потоке газа, как правило, наблюдаются ударные волны. При $M = 3$ их толщина порядка длины свободного пробега молекул. В этом случае вязкостью и теплопроводностью газа можно пренебречь, заменив их действие поверхностями разрыва, на которых сохраняются потоки массы, количества движения и энергии.

Современное состояние

На нач. 21 в. в рамках М. ж. и г. глубоко проработан целый ряд теорий, описывающих разл. процессы в жидкостях и газах. Это теории потенциальных и вихревых течений, теория крыла конечного размаха, теория поверхностных и внутр. волн и их взаимодействия с твёрдыми телами (в частности, вопросы волнового сопротивления надводных и подводных кораблей), теория плоских, осесимметричных и винтовых течений, теория обтекания тел со срывом струй, теория медленных течений вязких

жидкостей и течений в трубах разл. профиля, теория смазки и теория пограничного слоя. Исследована устойчивость ламинарного режима течения вязкой жидкости и его переход в турбулентный режим, предложены разл. схемы осреднённого моделирования турбулентных движений. Решены мн. задачи ускорения тел сжатым газом, распространения сильных взрывных волн и их воздействия на препятствия. Развита теория тепло- и массопереноса в движущейся жидкости, теория фильтрации жидкостей и газов сквозь пористые среды, теория конвекции, теория движения смесей жидкостей, газов и твёрдых частиц, теория атмосферных и океанич. вихрей и др. К проблемам, решаемым М. ж. и г., можно отнести также задачи движения плазмы.

На совр. уровне развития М. ж. и г. применяемые модели становятся всё более сложными, т. к. учитывают ряд особенностей среды, напр. её электр. проводимость, ионизацию, поляризацию и намагничивание, а также происходящие в среде химич. реакции и фазовые переходы. При описании условий на границах потока учитывается поверхностное натяжение, а также тепло- и массообмен. Если длина свободного пробега частиц газа превышает характерный размер задачи (напр., при рассмотрении газа в вакуумных приборах или верхних слоях атмосферы), необходимо использовать методы теории разреженных газов (см. [Динамика разреженных газов](#)).

Уравнения М. ж. и г. нелинейны, что приводит к большим трудностям при решении разл. практич. задач. Для решения уравнений М. ж. и г. применяются аналитич. методы, связанные с разложениями в ряды по координатам и времени, асимптотич. методы, использующие разложения по малому параметру, а также групповые методы, связанные с построением точных решений. Важной особенностью совр. этапа развития М. ж. и г. является создание больших пакетов вычислит. программ, направленных на решение тех или иных технич. проблем. Проводятся масштабные численные эксперименты по математич. моделированию разл. процессов.

Большое внимание уделяется эксперим. вопросам М. ж. и г., при этом в исследованиях используются методы как натурных испытаний, так и прямого или аналогового моделирования, основанные на применении методов подобия и размерности. Для изучения течений и моделирования проблем обтекания и разгона тел применяются

спец. гидродинамич. и аэродинамич. трубы, открытые каналы и бассейны, многоступенчатые баллистич. установки и др. устройства.

В России науч. исследования в области М. ж. и г. проводятся в вузах Москвы (МГУ, МАИ, Моск. физико-технич. ин-т), С.-Петербурга (С.-Петерб. гос. ун-т, С.-Петерб. гос. ун-т гражданской авиации, С.-Петерб. гос. морской технич. ун-т), Новосибирска, Томска, Красноярска, Казани и др. Теоретич. и эксперим. исследования в этой области ведутся также в ЦАГИ (см. [Аэрогидродинамический институт](#)), [Гидродинамики институте](#), [Авиационного моторостроения институте](#), [Проблем механики институте](#), [Теплофизики институте](#), НИИ механики МГУ, Ин-те теоретич. и прикладной механики СО РАН, Ин-те автоматике и процессов управления ДВО РАН и др.

Результаты исследований в области М. ж. и г. публикуются в журналах: «Доклады РАН» (серии «Математика», «Физика»), «Известия РАН» (серия «Механика жидкости и газа»), «Прикладная математика и механика», «Прикладная механика и техническая физика», «Теплофизика и аэромеханика», «Физика горения и взрыва» и др.

Применение. Практич. приложения совр. М. ж. и г. чрезвычайно разнообразны. Она используется при проектировании и создании кораблей, самолётов и ракет, конструировании двигателей; расчётах трубопроводов и насосов, газовых и гидротурбин, водосливных плотин; при изучении мор. и воздушных течений; прогнозе погоды и расчётах массо- и теплообмена в атмосфере; при изучении фильтрации грунтовых вод, нефти и газа и организации их добычи; во многих технологич. процессах нано- и микропроизводства, пищевой, мед., металлургич. и химич. пром-сти.

Большое значение имеет приложение методов М. ж. и г. к объяснению и использованию природных явлений, связанных, напр., с движением тектонич. плит и извержением вулканов, движением лавин и мутьевых потоков, с механизмами плавания рыб и полёта птиц, кровообращением и дыханием. М. ж. и г. описывает процессы самых разл. масштабов – от столкновений элементарных частиц и течений квантовых жидкостей до строения звёзд и эволюции Вселенной.

Литература

Лит.: Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. М., 1963.

Ч. 1. 6-е изд. Ч. 2. 4-е изд.; Седов Л. И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. 3-е изд. М., 1980; Черный Г. Г. Газовая динамика. М., 1988; Аэрогидромеханика. М., 1993; Прандтль Л. Гидроаэромеханика. 2-е изд. М.; Ижевск, 2002; Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. 7-е изд. М., 2003.

Processing math: 100%