



МЕХАНИКА

Авторы: В. Ф. Журавлёв

МЕХАНИКА (от греч. μηχανική – наука о машинах, искусство построения машин), наука, которая формирует и исследует математич. модели движения и взаимодействия материальных тел.

Методы М. применимы к исследованию разл. природных процессов (движение небесных тел, возд. и мор. течения, колебания земной коры, движение атомов и молекул и т. д.). М. является науч. основой всех областей техники. Хотя значит. часть перспективных технологий основана на достижениях др. наук (физики, химии, биологии), для практич. реализации этих достижений необходимо привлечение М. Причём пренебрежение рекомендациями М. чревато техногенными катастрофами, масштаб и последствия которых возрастают вместе с усложнением производств.

Принципы построения и разделы механики

Теоретич. основы М. обычно излагают в аксиоматич. форме. Для этого вначале вводятся такие категории, как материальная точка, сила и т. п. Затем формулируются аксиомы, задающие связи между введёнными категориями, устанавливаются правила логич. вывода (напр., принцип исключённого третьего). Подобная аксиоматич. основа (удовлетворяющая требованиям непротиворечивости, полноты и минимальности) используется для построения теории, как правило, формулируемой в виде теорем. Сопоставление к.-л. объектов реального мира с категориями аксиоматич. системы называется реализацией аксиоматич. системы. Сформированная т. о. теоретич. основа М. называется механич. моделью реального мира.

Исторически первой подобной моделью была [классическая механика](#), в основе которой лежат [Ньютона законы механики](#). Эта модель применима в тех задачах, где рассматриваются тела макромира, скорости движения которых много меньше скорости света. Движение тел со скоростями, сравнимыми со скоростью света, изучается с помощью др. механич. модели – [относительности теории](#). Движения объектов микромира рассматривает [квантовая механика](#).

Для изучения объектов реального мира в М. используют модели, каждая из которых применима к определённому классу объектов в определённых условиях. Так, понятие [материальной точки](#), вводимое в аксиоматич. основе, используется в качестве модели объектов, размеры которых пренебрежимо малы по сравнению с проходимыми ими расстояниями. Более сложной является модель абсолютно твёрдого тела – тела, состоящего из совокупности материальных точек, расстояние между которыми остаётся неизменным при любом движении тела. Такая модель применяется в тех ситуациях, когда деформации тела пренебрежимо малы по сравнению с расстояниями, проходимыми точками тела. Модель изменяемой сплошной среды используется при изучении движений деформируемого твёрдого тела, жидкости или газа в тех случаях, когда можно пренебречь молекулярной структурой среды. В соответствии с описанными моделями различают следующие разделы М.: М. материальной точки, М. системы материальных точек, М. абсолютно твёрдого тела, [механика сплошной среды](#) (в

которой выделяют теорию [упругости](#), теорию [пластичности](#), [механику жидкости и газа](#) и др.). В каждом из этих разделов рассматриваются также более специализир. модели: идеально упругое тело, пластическое тело, вязко-пластическое тело, идеальная жидкость, вязкая жидкость, стратифицированная жидкость, идеальный газ и др.

Изучение вытекающих из принятой аксиоматич. основы законов и принципов движения и равновесия тел составляет содержание теоретической механики. В соответствии с характером решаемых задач М. подразделяют на [статику](#) – учение о равновесии тел, находящихся под действием произвольных сил, [кинематику](#) – учение о геометрич. свойствах движения тел, и [динамику](#) – учение о движении тел под действием сил. Разделами теоретич. М., имеющими самостоят. значение, являются теория [колебаний](#), теория [устойчивости движения](#), теория гироскопич. и навигационных систем, [механика тел переменной массы](#), теория [удара](#) и др.

М. тесно связана со многими разделами физики. Ряд понятий и методов М. непосредственно или при соответствующих обобщениях находят приложение в оптике, статистич. физике, физике твёрдого тела, квантовой механике, электродинамике, теории относительности и пр. Кроме того, для решения конкретных задач методы теоретич. М. приходится совмещать с методами термодинамики, молекулярной физики, теории электричества и др. Таковы, напр., задачи [газовой динамики](#), теории [взрыва](#), теплообмена в движущихся жидкостях и газах, [динамики разреженных газов](#), [магнитной гидродинамики](#) и др. М. играет существенную роль во многих разделах астрономии, особенно в [небесной механике](#).

К М. следует отнести дисциплины, связанные с техникой, такие как [машин и механизмов теория](#), [сопротивление материалов](#), [строительная механика](#), [гидравлика](#), внешняя [баллистика](#), ряд разделов технологии и др. Все подобные дисциплины используют уравнения и методы теоретич. механики.

Основные понятия и методы механики

В аксиоматич. основу М. входят такие категории, как время и положение в пространстве. Производными от этих понятий являются: для точки – её [скорость](#) и [ускорение](#), для твёрдого тела – скорость и ускорение поступательного движения, а также [угловая скорость](#) и [угловое ускорение](#) вращательного движения тела. Кинематич. состояние деформируемого твёрдого тела характеризуется относит. удлинениями и сдвигами его частиц; совокупность этих величин определяет т. н. тензор деформаций. Кинематич. состояние жидкостей и газов характеризуется тензором скоростей деформаций; кроме того, при изучении поля скоростей движущейся жидкости используют понятие вихря, характеризующего вращение бесконечно малой частицы.

Одной из осн. категорий аксиоматики М. является [сила](#). В области реализации системы аксиом ей соответствует мера механич. взаимодействия материальных тел. Производным понятием от силы является [момент силы](#) относительно точки и относительно оси. В М. сплошной среды силы задаются их поверхностным или объёмным распределением, т. е. отношением величины силы к элементу площади поверхности тела (для поверхностных сил) или к элементу объёма тела (для массовых сил), на которые соответствующая сила действует. Возникающие в сплошной среде внутр. напряжения характеризуются в каждой точке среды касательными и нормальными [напряжениями механическими](#), совокупность которых представляет собой величину, называемую тензором напряжений. Ср. арифметическое трёх нормальных напряжений, взятое с обратным знаком, определяет величину, называемую [давлением](#) в данной точке среды.

К осн. категориям аксиоматич. основы М. относится также [масса](#) материальной точки. В области реализации системы аксиом ей соответствует мера инертности материального тела, размеры которого в рассматриваемой задаче значения не имеют. Инертность материального тела конечных размеров зависит не только от его общей массы, но и от распределения масс в теле, которое характеризуется положением центра масс и величинами, называемыми осевыми и центробежными [моментами инерции](#); совокупность этих величин определяет т. н. тензор инерции. Инертность жидкости и газа характеризуется их плотностью.

Законы Ньютона, лежащие в основе М., справедливы по отношению к [инерциальной системе отсчёта](#) и позволяют записать осн. уравнения динамики точки и системы материальных точек. В М. сплошной среды, кроме законов Ньютона, используются также законы, отражающие свойства данной среды и устанавливающие для неё связь между тензорами напряжений и деформаций (или скоростей деформаций). Это [Закон Гука](#) для линейно-упругого тела и закон Ньютона для вязкой жидкости (см. [Вязкость](#)). Др. среды подчиняются законам, выведенным в теории пластичности и [реологии](#).

Важную роль в М. играют динамич. меры движения ([импульс](#) тела, [кинетический момент](#), [кинетическая энергия](#)) и меры действия силы ([импульс силы](#) и [работа](#) силы). Соотношениями между мерами движения и мерами действия силы задаются теоремы об изменении количества движения, момента количества движения и кинетич. энергии, называемые общими теоремами динамики. Эти теоремы и вытекающие из них [сохранения законы](#) выражают свойства движения любой системы материальных точек и сплошной среды.

При рассмотрении несвободной системы материальных точек (т. е. системы, на движение которой налагаются заданные наперёд ограничения) говорят о системе со [связями механическими](#). Равновесие и движение такой системы изучают методами [аналитической механики](#), опираясь на [вариационные принципы механики](#), а также на [Д'Аламбера принцип](#). При решении задач М. широко используются также вытекающие из её законов или принципов дифференциальные уравнения движения материальной точки, твёрдого тела и системы материальных точек ([Лагранжа уравнения](#), [Гамильтона уравнения](#), [Гамильтона – Якоби уравнение](#) и др.), а в М. сплошной среды – соответствующие уравнения равновесия или движения этой среды, уравнение неразрывности среды и уравнение энергии.

Исторический очерк

М. – одна из древнейших наук. Ещё в 6 в. до н. э. [Пифагор](#) и его школа составили, по-видимому, первые представления о геоцентрич. кинематике небесных тел. Первыми дошедшими до нас трактатами по М. являются натурфилософские сочинения [Аристотеля](#) (4 в. до н. э.), который ввёл и сам термин «М.». Из этих сочинений следует, что в то время были известны законы сложения и уравнивания сил (приложенных к одной точке и действующих вдоль одной и той же прямой), свойства простейших машин и закон равновесия рычага. Однако эти представления были чисто умозрительными, т. е. очень далёкими от совр. принципов построения науки. Первые науч. основы статики были разработаны [Архимедом](#) (3 в. до н. э.). Его труды содержат строгую теорию рычага, понятие о статич. моменте, правило сложения параллельных сил, учение о равновесии и центре тяжести, начала гидростатики.

В средние века существенный вклад в исследования по статике внесли европ. математик И. Неморарий (13 в.), [Леонардо да Винчи](#) (15 в.), С. [Стевин](#) (16 в.). Их работы привели к установлению правила параллелограмма сил

и развитию понятия о моменте силы. В 17 в. П. [Вариньон](#) внёс в статику правила сложения и разложения сил, доказал теорему о моменте равнодействующей сил. В 19 в. Л. [Пуансо](#) разработал теорию пар сил (1804). Последним этапом в строгом построении статики явилась теория скользящих векторов, созданная Ж. [Понселе](#) (1822).

Другое направление статики, базирующееся на принципе виртуальных перемещений, развивалось в тесной связи с учением о движении. Первые дошедшие до нас рассуждения о видах движения содержатся в трудах Аристотеля. Под движением тел Аристотель понимал любые их изменения: формы, качества (напр., цвета) и местоположения. Последний тип движения – это [движение механическое](#), к простейшим видам которого Аристотель относил движение по окружности и движение по прямой. Любое др. механич. движение, по его мнению, есть «смещение» этих двух. Напр., движение брошенного тела можно рассматривать как сумму двух движений: по прямой к центру Земли и по окружности вокруг центра Земли. Кинематика движений планет в геоцентрич. концепции разрабатывалась учёными Древней Греции и особенно [Птолемеем](#) (2 в. н. э.).

Учение Аристотеля, посвящённое динамике, господствовало в науке почти до 17 в. Однако оно базировалось на ошибочных представлениях о том, что движущееся тело всегда находится под действием некоторой силы, скорость падающего тела пропорциональна его весу и т. п. Существование пустоты Аристотель отрицал на том основании, что пустота не может сопротивляться движущемуся в ней телу, из-за чего скорость тела должна была быть бесконечной, что невозможно.

Науч. основы динамики (а с ней и всей М.) создавались в 17 в. Уже в 15–16 вв. в странах Зап. и Центр. Европы развитие ремёсел, торговли, мореплавания и воен. дела поставило перед наукой ряд задач: исследование полёта снаряда, удара тел, прочности больших кораблей, колебаний маятника и др. Для решения этих задач требовалось развитие динамики при условии отказа от ошибочных положений учения Аристотеля. Первый важный шаг в этом направлении сделал Н. [Коперник](#) (16 в.), гелиоцентрич. теория которого позволила внести в М. понятие относительности движения и осознать необходимость выбора системы отсчёта. Затем И. [Кеплер](#) открыл кинематич. законы движения планет ([Кеплера законы](#), нач. 17 в.). Окончательно ошибочные положения аристотелевой динамики опроверг Г. [Галилей](#), заложивший основы совр. М. Он дал первое верное решение задачи о движении тела под действием силы, экспериментально установив закон равноускоренного падения тел в вакууме. Галилей выдвинул два осн. положения М.: принцип относительности классич. М. и закон инерции. Он первым нашёл, что траекторией тела, брошенного в вакууме под углом к горизонту, является парабола (при этом была использована идея сложения горизонтального и вертикального движений). Открыв изохронность малых колебаний маятника, Галилей положил начало теории колебаний. При исследовании условий равновесия простых машин и решении некоторых задач гидростатики Галилей использовал т. н. золотое правило статики (сформулированное им в общем виде) – начальную форму [возможных перемещений принципа](#). Он первым исследовал прочность балок и тем самым положил начало науке о сопротивлении материалов. Одна из важных заслуг Галилея – планомерное введение в М. науч. эксперимента.

Современник Г. Галилея Р. [Декарт](#) в основу своих исследований по М. положил сформулированный в общем виде закон инерции и высказанный им закон сохранения количества движения; он же ввёл понятие импульса силы. Следующий крупный шаг в развитии М. был сделан Х. [Гюйгенсом](#), который решил важнейшие для того времени задачи динамики – исследование движения точки по окружности, колебаний физич. маятника и законов упругого удара тел. При этом он впервые ввёл понятия центростремительной и центробежной сил, момента

инерции (сам термин принадлежит Л. [Эйлеру](#)). Гюйгенс также применил принцип, по существу эквивалентный закону сохранения механич. энергии, общее математич. выражение которого дал впоследствии Г. [Гельмгольц](#).

Окончательную формулировку осн. законов М. дал И. [Ньютон](#) (1687); завершив исследования своих предшественников, он обобщил понятие силы и ввёл в М. понятие массы. Законы М., сформулированные Ньютоном, позволили ему успешно разрешить большое число задач небесной механики (базирующейся на открытом им же [всемирного тяготения законе](#)) и М. системы материальных точек. В 17 в. были установлены также два исходных положения М. сплошной среды: Ньютон открыл закон внутр. трения в жидкостях и газах, а Р. [Гук](#) – осн. закон упругости. На рубеже 17–18 вв. франц. инж. Г. Амонтон экспериментально установил законы сухого трения, которые позднее были подтверждены Ш. [Кулоном](#).

В 18 в. интенсивно развивались общие аналитич. методы решения задач М., базирующиеся на использовании исчисления бесконечно малых, открытого И. Ньютоном и Г. [Лейбницем](#). Гл. заслуга в применении этого исчисления для решения задач М. принадлежит Л. Эйлеру. Он разработал аналитич. методы решения задач динамики материальной точки, развил теорию моментов инерции и заложил основы М. твёрдого тела. Ему принадлежат также первые исследования по теории корабля, теории устойчивости упругих стержней, теории турбин и решение ряда прикладных задач кинематики.

Важным этапом развития М. в 18 в. было создание динамики несвободных механич. систем. При решении этой проблемы исследователи исходили из двух осн. принципов: принципа возможных перемещений и принципа Д'Аламбера. Развитию и обобщению первого принципа, выражающего общее условие равновесия механич. системы, в 18 в. были посвящены работы И. Бернулли (см. [Бернулли](#)), Л. [Карно](#), Ж. [Фурье](#), Ж. [Лагранжа](#) и др. Используя эти два осн. принципа, Лагранж завершил разработку аналитич. методов динамики свободной и несвободной механич. систем и получил уравнения движения системы в обобщённых координатах. Им же были разработаны основы совр. теории колебаний.

Другое направление в решении задач М. в 18 в. основывалось на [наименьшего действия принципе](#) в том его виде, который для одной точки высказал П. Л. [Мопертюи](#) и развил Л. Эйлер, а на случай механич. систем обобщил Ж. Лагранж. В тот же период значит. развитие получила небесная механика (в трудах Эйлера, Ж. [Д'Аламбера](#), Лагранжа и особенно П. [Лапласа](#)). Приложение аналитич. методов к М. сплошной среды привело к разработке теоретич. основ гидродинамики идеальной жидкости. основополагающими здесь явились труды Эйлера, а также Д. Бернулли, Лагранжа, Д'Аламбера.

В 19 в. продолжалось интенсивное развитие всех разделов М. Ряд важных результатов в решении проблемы устойчивости равновесия и движения получили Ж. Лагранж, англ. учёный Э. Раус и Н. Е. [Жуковский](#) (строгая постановка данной задачи и разработка наиболее общих методов её решения принадлежит А. М. [Ляпунову](#)). И. А. [Вышнеградский](#) разработал основы совр. теории автоматич. регулирования. Важный вклад в прикладные исследования по кинематике механизмов внёс П. Л. [Чебышев](#).

Во 2-й пол. 19 в. в самостоятельный раздел М. выделилась кинематика. Этому способствовали работы ряда учёных. Г. [Кориолис](#) доказал теорему о составляющих ускорения, явившуюся основой М. относительного движения. Франц. учёные Ж. Понселе и А. Резаль ввели чисто кинематич. термин «ускорение». Л. Пуансо дал ряд наглядных геометрич. интерпретаций движения твёрдого тела.

Значит, развитие в 19 в. получила и М. сплошной среды. В работах Л. [Навье](#) и О. [Коши](#) были выведены общие уравнения теории упругости. Исследования Навье и Дж. [Стокса](#) привели к установлению дифференциальных уравнений движения вязкой жидкости. Развивалась также динамика идеальной и вязкой жидкости: Г. Гельмгольц разработал учение о вихрях, Г. [Кирхгоф](#) и Н. Е. Жуковский исследовали отрывное обтекание тел, О. [Рейнольдс](#) начал изучение турбулентных течений, Л. [Прандтль](#) создал теорию пограничного слоя. В тот же период Н. П. [Петров](#) построил гидродинамич. теорию трения при смазке (развитую позднее др. учёными), А. [Сен-Венан](#) предложил первую математич. теорию пластич. течения металла.

В 20 в. перед М. возникли новые задачи, связанные с развитием радиотехники, проблемами автоматич. регулирования и др. Это вызвало появление новых областей науки – теории нелинейных колебаний, развитие которой началось с трудов А. М. Ляпунова и А. [Пуанкаре](#), и теории автоколебаний (А. А. [Андронов](#) и др.). Развитие динамики тел переменной массы (заложенной ещё в кон. 19 в. И. В. [Мещерским](#)) позволило создать теорию реактивного движения и движения ракет (первые работы в этой области принадлежат К. Э. [Циолковскому](#)). Ещё в 1843 У. [Гамильтон](#) открыл исчисление [кватернионов](#), давшее толчок к развитию векторного исчисления. Это открытие в 20 в. нашло эффективное применение в кинематике твёрдого тела, резко упростив решение задач инерциальной навигации.

В М. сплошной среды в 20 в. благодаря работам Н. Е. Жуковского и С. А. [Чаплыгина](#) появились два новых раздела: соответственно аэродинамика и газовая динамика. Труды этих учёных имели огромное значение для развития всей совр. гидроаэродинамики.

Теоретич. основы классич. М., заложенные И. Ньютоном более 300 лет тому назад, остаются базой подавляющего числа разделов точного естествознания. А. Пуанкаре (один из создателей теории относительности) писал: «...классическая механика будет и в будущем так же необходима, как и теперь, и тот, кто не будет знать её основательно, не будет в состоянии понять и новую механику».

Современные проблемы механики

В нач. 21 в. к числу важнейших проблем М. относят задачи теории колебаний (особенно нелинейных), динамики твёрдого тела, теории устойчивости движения, а также М. тел переменной массы и динамики космич. полётов. Быстро развивается новая область М. – [робототехника](#), которая вместе с инерциальной навигацией, гироскопич. техникой и рядом др. традиц. разделов М. породила новую область М., получившую назв. [мехатроника](#). В мехатронике рассматриваются электронно-механич. системы, в которых положит. эффект достигается только в результате тесной взаимосвязи механич. и электронной частей системы.

В М. сплошной среды весьма актуальной является проблема изучения движения макрочастиц при изменении их формы. Для решения этой задачи требуются разработка строгой теории турбулентных течений жидкости, решение проблем пластичности и ползучести, а также создание обоснованной теории прочности твёрдых тел. Новые проблемы М. твёрдого тела возникли в связи с появлением возможностей конструирования [наноматериалов](#).

Широкий круг вопросов М. связан также с изучением движения плазмы в магнитном поле, необходимым для решения одной из самых актуальных проблем совр. физики – осуществления управляемого термоядерного синтеза.

Гидродинамика среди прочего рассматривает проблемы больших скоростей в авиации, баллистике, турбостроении и двигателестроении. Много новых задач возникает на стыке М. с др. областями наук. К ним относятся, напр., проблемы гидротермохимии (исследования механич. процессов в жидкостях и газах, вступающих в химич. реакции), изучение сил, вызывающих деление клеток, механизма образования мускульной силы.

Ведущими н.-и. центрами, занимающимися проблемами М. в России, являются [Проблем механики институт](#), [Машиноведения институт](#), [Гидродинамики институт](#), Ин-т механики сплошных сред УрО РАН, [Аэрогидродинамический институт](#), НИИ механики МГУ.

Результаты исследований, относящихся к разл. областям М., публикуются в многочисл. периодич. изданиях: «Доклады РАН» (серии «Математика», «Физика», с 1965), «Известия РАН» (серии «Механика твёрдого тела», «Механика жидкости и газа», с 1966), «Прикладная математика и механика» (с 1933), «Журнал прикладной механики и технической физики» (изд. СО РАН с 1960), «Проблемы машиностроения и надёжности машин» (с 1965) и др.

Для координации науч. исследований в области М. периодически проводятся междунар. конгрессы и конференции, организуемые [Международным союзом теоретической и прикладной механики](#). Рос. нац. комитеты по теоретич. и прикладной М., теории машин и механизмов и трибологии совместно с др. науч. учреждениями периодически организуют всерос. съезды и конференции, посвящённые исследованиям в разл. областях механики.

Литература

Лит.: Механика в СССР за 50 лет. М., 1968–1973. Т. 1–4; История механики с древнейших времен до конца XVIII в. / Под ред. А. Т. Григорьяна, И. Б. Погребысского. М., 1971; История механики с конца XVIII в. до середины XX в. / Под ред. А. Т. Григорьяна, И. Б. Погребысского. М., 1972; Меркин Д. Р. Краткая история классической механики Галилея – Ньютона. М., 1994; Журавлев В. Ф. Основы теоретической механики. 3-е изд. М., 2008; Бухгольц Н. Н. Основной курс теоретической механики. 10-е изд. СПб., 2009. Ч. 1–2.

См. также лит. при статьях [Аналитическая механика](#), [Динамика](#), [Кинематика](#), [Статика](#).