

УДК 621.01

ОБ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЯХ И ЗАКОНАХ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ ◆◆◆◆ ON THE BASIC CONCEPTS AND LAWS OF THE CLASSICAL MECHANICS

Смелягин Анатолий Игоревич

доктор технических наук, профессор
кафедры наземного транспорта и механики,
Кубанского государственного
технологического университета
asmelyagin@yandex.ru

Аннотация. Наука, изучающая механические взаимодействия, движения и равновесие материальных тел, называется Механикой. Фундамент современной классической механики построен на трудах Галилея, Ньютона, Эйлера и таких понятиях как – пространство, время, материальное тело, материальная точка, масса, движение, покой, кинематические характеристики движения, меры движения, взаимодействие, связь, меры взаимодействия. Анализ законов – аксиом И. Ньютона показывает, что строго говоря, они не являются ни законами и ни аксиомами. Это обусловлено тем, что они описывают движение только не существующих в природе объектов, а именно, материальных точек. Основные понятия классической механики в настоящее время точно не определены и не сформулированы. Следовательно, классическая механика нуждается в построении новой теоретической базы. Уточнены и сформулированы основные понятия и реальные законы классической механики.

Ключевые слова: аксиомы, законы, взаимодействие, механическое движение, сила, связь, масса, время, пространство, покой, равновесие, кинематические характеристики, меры движения, меры взаимодействия.

Smelyagin Anatoly Igorevich

Doctor of technical sciences, Professor
Department of land transport and mechanics,
Kuban State Technological University

Annotation. A science that studies mechanical interactions, movements, and the equilibrium of material bodies is called Mechanics. The foundation of modern classical mechanics is based on the works of Galileo, Newton, Euler and such concepts as space, time, material body, material point, mass, motion, peace, kinematic characteristics of motion, motion measures, interaction, communication, interaction measures. The analysis of laws – the axioms of I. Newton shows that, strictly speaking, they are neither laws nor axioms. This is due to the fact that they describe the movement of only objects that do not exist in nature, namely, material points. The basic concepts of classical mechanics are currently not precisely defined and not formulated. Consequently, classical mechanics needs to build a new theoretical base. The basic concepts and real laws of classical mechanics are refined and formulated.

Keywords: axioms, laws, interaction, mechanical motion, force, connection, mass, time, space, peace, equilibrium, kinematic characteristics, measures of motion, measures of interaction.

Введение

Наука, изучающая механические движения, взаимодействия и равновесие материальных тел называется Механикой [1–3].

Современная механика разделяется на классическую механику и общую и специальную теорию относительности (ОТО и СТО) [1–6].

Изучением движения материальных тел и механических систем, при скоростях исследуемых объектов:

- значительно меньших скорости света, занимается классическая механика;
- приближающихся к скорости света, занимаются ОТО и СТО.

Практически все технические устройства, которые были созданы человечеством имеют скорости значительно меньшие чем скорость света и поэтому они сделаны с использованием законов и методов расчета классической механики.

Классическая механика, в отличие от общей теории относительности, прошла многократную строгую теоретическую и экспериментальную проверку и гарантированно обеспечивает требуемую точность технических расчётов. Поэтому применять в инженерной и научной деятельности практически не проверенные практикой другие теории, которые сильно усложняют расчёты и исследования создаваемых устройств и при этом не повысят их реальную точность расчёта, не имеет никакого смысла [4, 6].

Фундамент современной классической механики построен на идеях, трудах, аксиомах и законах, Галилея [7], Ньютона [8] и Эйлера [9] и таких основных понятиях [1–13] как:

- 1) материальное тело;
- 2) материальная точка;
- 3) масса;

- 4) движение;
- 5) покой;
- 5) пространство;
- 7) время;
- 8) кинематические характеристики движения;
- 9) меры движения;
- 10) взаимодействие;
- 11) связь;
- 12) меры взаимодействия.

Как показано в [4, 5, 6, 10, 11, 12] практически все основные понятия классической механики чётко не определены, а законы и аксиомы в основном:

- относятся не к реальным объектам (телам), а к виртуальным материальным точкам;

- сформулированы только для объектов совершающих поступательное движение.

Следовательно, современная классическая механика нуждается в построении соответствующей времени теоретической базы [4, 5].

Основные понятия и определения

Любая наука имеет право на существование только в том случае, если она строится на законах природы и точной и логичной терминологии. Поэтому сформулируем и определим основные понятия классической механики.

Вселенная состоит из различных объектов, в том числе и из *материальных тел*.

Материальное тело – это вещество, сосредоточенное в определенном объёме, или объект Вселенной, который имеет массу, геометрические размеры (объём) и отделенный от других тел внешней границей [6].

Материальные объекты могут быть твёрдыми, жидкими, газообразными плазменными.

Масса – это количество вещества (материи) находящегося в теле [6].

Масса это один из наиболее важных параметров материального тела, который определяет энергетические (количество энергии), кинематические (соэнергию [11] или количество движения) и динамические (момент инерции) свойства тела.

Часто в механике для удобства проводимых исследований используют такое понятие как *материальная точка*.

Материальная точка – это виртуальный объект, который имеет массу, но не имеет геометрических размеров.

Материальная точка (МТ) это математическая абстракция, придуманная для упрощения исследования реальных материальных объектов (тел) [6]. В общем случае понятие МТ можно применять при приближённых исследованиях движений материальных объектов. Понятие МТ целесообразно использовать только при исследовании траектории (центра масс) движения объекта. В этом случае роль МТ исполняет центр масс объекта.

Все материальные тела Вселенной постоянно находится в движении, то есть они всегда изменяют своё положение, форму и состав.

Движение – это любое (физическое, химическое) изменение, происходящее с материальным телом [11].

В механике под *движением* понимают перемещение материального тела в исследуемом *пространстве*.

Движения тел разделяют на простейшие (поступательное и вращательное) и сложные (результаты сложений простейших движений).

Так как во Вселенной все объекты всегда находятся в движении, то любое механическое движение материальных тел является относительным.

Покой (равновесие) – это движение исследуемых объектов относительно друг друга с одинаковыми кинематическими параметрами.

Если исследуемые объекты движутся в пространстве с одинаковыми кинематическими характеристиками, то условно считают, что они *неподвижны* друг относительно друга.

Практически любая теория о движении материальных тел строится на таких понятиях как *пространство* и *время* [5].

Пространство – это многогранное и, прежде всего, абстрактное философское понятие [6].

В физике термин «пространство» понимают в двух смыслах [6]:

- физическое *пространство* – трёхмерное пространство нашего повседневного мира в котором определяется положение физических тел и происходит механическое движение, геометрическое перемещение различных физических тел и объектов;

- различные абстрактные *пространства* в том смысле, как они понимаются в математике, не имеющие к обычному («физическому») пространству никакого отношения.

В классической механике приняты некорректные понятия абсолютного и относительного *пространства*, сформулированные И. Ньютоном [8]. Следует отметить, что как сам И. Ньютон, так и авторы современных трудов по механике [4, 5], считают эти понятия общеизвестными и потому полагают, что нет необходимости их правильно формулировать и объяснять.

Сформулируем понятие пространства.

Пространство – это мысленная часть Вселенной, сформированная для изучения движения исследуемого материального объекта.

Так как во Вселенной исследуемых материальных объектов бесконечное множество, то для моделирования их движения нужно такое же количество пространств.

В механике пространство чаще всего образуют с помощью осей прямоугольной (Декартовой) системы координат и его считают Евклидовым.

Оси – это определенным образом направленные отрезки линий.

Оси могут быть как размерными (на них наносятся шкалы), так и безразмерными.

Оси – это субъективный выбор исследователя.

Чтобы правильно изучать движение исследуемого объекта созданное пространство должно обладать всеми свойствами той части Вселенной, в которой находится этот объект.

Пространство характеризуют мерностью M . Мерность пространства определяется числом координат его образующих. Реальные пространства могут быть одно ($M=1$), двух ($M = 2$) и трёхмерными ($M = 3$) (рис.1).

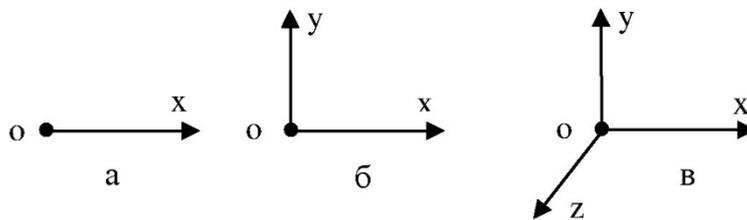


Рисунок 1 – Пространства
а – одномерное ($M = 1$), б – двухмерное ($M = 2$), в – трёхмерное ($M = 3$)

Исследуемые объекты могут существовать (перемещаться) в одно, двух и трёхмерных пространствах [14–17]. Например, канатоходец при его перемещении по канату движется в одномерном пространстве, а самолёт летит – в трёхмерном пространстве.

Пространства также целесообразно характеризовать [14–17] подвижностью или числом степеней свободы.

Подвижность пространства Π определяется числом независимых простейших движений, реализуемых в нём (рис. 2).

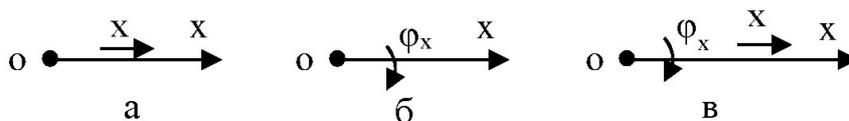


Рисунок 2 – Подвижности пространства
а – одномерное ($M = 1$) одноподвижное ($\Pi = 1$) пространство в котором реализуется одно простейшее поступательное движение вдоль оси x ;
б – одномерное ($M = 1$) одноподвижное ($\Pi=1$) пространство в котором реализуется одно простейшее вращательное движение вокруг оси x ;
в – одномерное ($M = 1$) двухподвижное ($\Pi = 2$) пространство в котором реализуется два простейших движения – поступательное вдоль и вращательное вокруг оси x

Подвижность пространств в зависимости от видов исследуемых объектов и механических систем может варьироваться от единицы до шести [14–17].

Время – это субъективная абстракция, введённая для упрощения информационного и математического моделирования движений, процессов и явлений, происходящих во Вселенной и обществе.

Время – это не объект Вселенной и, поэтому, оно не существует [6].

Время – это параметр или одна из возможных осей для создания того или иного математического пространства.

Время, как и любую другую ось, можно измерять различными способами. Так, например, время измеряют секундами, колебаниями, сутками, годами, объемами песка и воды, шагами, расстояниями и т.д.

Механическое движение материальных объектов определяется следующими *кинематическими характеристиками*:

- 1) траекторией;
- 2) законом движения;
- 3) скоростью;
- 4) ускорением;
- 5) аналогом скорости;
- 6) аналогом ускорения.

Траектория точек – это совокупность в пространстве точек (линия), в которых они уже были или будут находиться.

Траектория тела – это совокупность в пространстве точек (линия), в которых центр масс материального тела уже был или будет находиться.

Закон движения – это функциональная зависимость радиус-вектора (перемещения, координаты) исследуемой точки материального объекта от времени:

$$\vec{r} = f(t). \quad (1)$$

Скорость – это быстрота изменения радиус-вектора (перемещения, координаты) исследуемой точки материального объекта во времени:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что *скорость* – это первая производная от радиус-вектора (перемещения, координаты) исследуемой точки материального объекта по времени.

Ускорение – это быстрота изменения скорости исследуемой точки материального объекта во времени:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что *ускорение* – это первая производная от скорости исследуемой точки материального объекта по времени.

Так как скорости и ускорения определяются как производные по параметру времени, которое, как показано выше, не существует в природе, то лучше вместо этих понятий использовать понятия аналогов скоростей и ускорений [14, 18, 20].

При исследовании машин и механизмов вводятся понятия аналогов скоростей и ускорений. *Аналоги* скоростей и ускорений применяются при кинематическом и динамическом анализе машин и механизмов, когда предварительно нельзя определить скорости и ускорения исследуемых точек и звеньев.

Понятия *аналогов* скоростей и ускорений при кинематическом исследовании механизмов ввел Л.В. Ассур.

Аналогом скорости исследуемой точки какого-либо звена механизма является первая производная от перемещения этой точки по обобщенной координате механизма.

Так, если исследуемая точка совершает поступательное перемещение S_i , а обобщённой координатой является угол поворота начального (первого) звена механизма φ_1 , то аналог скорости исследуемой точки будет:

$$S'_{i\varphi_1} = \frac{dS_i}{d\varphi_1}. \quad (4)$$

Аналогом ускорения исследуемой точки какого-либо звена механизма является вторая производная от перемещения этой точки по обобщенной координате механизма.

Так, если исследуемая точка совершает поступательное перемещение S_i , а обобщенной координатой является угол поворота начального (первого) звена механизма φ_1 , то *аналог ускорения* исследуемой точки будет:

$$S''_{i\varphi_1} = \frac{d^2 S_i}{d\varphi_1^2}. \quad (5)$$

Из (4) и (5) следует, что *аналоги скоростей* и ускорений зависят только от движений тел (звеньев) и не зависят от времени и, следовательно, они представляют собой скорости движения точек одного тела относительно другого.

Отметим, аналоги скорости и ускорения, в общем-то, не очень корректные понятия. Правильнее было бы (4) и (5) определять, как скорости движения точек одного тела относительно другого или, как это делается при исследовании зубчатых передач, называть передаточным отношением.

Под *передаточным отношением* понимают отношение угловых скоростей ω взаимодействующих между собой звеньев. Так, если за начальное звено принять первое звено механизма, а второе за исследуемое, то передаточное отношение можно определить, как:

$$u_\omega = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{d\varphi_i/dt}{d\varphi_1/dt} = \frac{d\varphi_i}{d\varphi_1}. \quad (6)$$

В соответствии с (4) формулу (6) можно представить в виде:

$$\varphi'_{i\varphi_1} = \frac{d\varphi_i}{d\varphi_1}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что передаточное отношение u_ω – это аналог угловой скорости по Ассурю.

Поступая аналогично, найдем передаточное отношение для угловых ускорений

$$u_\varepsilon = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{d^2\varphi_i/dt^2}{d^2\varphi_1/dt^2} = \frac{d^2\varphi_i}{d\varphi_1^2}. \quad (8)$$

В соответствии с (5) формулу (8) можно представить в виде:

$$\varphi''_{i\varphi_1} = \frac{d^2\varphi_i}{d\varphi_1^2}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что передаточное отношение u_ε – это аналог углового ускорения по Ассурю.

Следовательно, как следует из (6) и (8), аналоги скоростей и ускорений было бы правильнее называть передаточными отношениями скоростей и ускорений, соответственно. Но так как понятия аналогов скоростей и ускорений являются общепринятыми в настоящее время, то менять их названия не имеет смысла. Важно то, что эти понятия позволяют исследовать кинематику и динамику механических систем без абстрактного параметра – времени.

Для удобства исследования движения материальных тел и механических систем в классической механике также вводятся такие понятия как *меры движения*.

Мерами движения являются:

- 1) сознергия (количество движения или импульс);
- 2) момент количества движения (кинетический момент);
- 3) кинетическая энергия.

В [8] И. Ньютон вводит понятие *количества движения*.

Отметим, что сам термин количество движения бессмыслен по определению [11]. Так слово количество – это числовое значение параметра, выражаемое в определенных единицах измерения, то есть предполагает счёт чего-либо, но подсчитать или посчитать количественно движение невозможно.

В физике обычно количество движения называют импульсом. Термин импульс, главным образом, относится к кратковременным процессам [11]. Применять термин импульс для физической величины, которая может быть, как кратковременной, так и длительной не логично.

Итак, термины «количество движения» и «импульс» формально не соответствуют своему смысловому назначению. Следовательно, эти термины надо заменить. Поэтому в [11] предлагается заменить термин количество движения и момента количества движения на сознергия.

Сознергия тела совершающего поступательное движение – это векторная величина равная произведению массы тела его на скорость:

$$\bar{K} = m\bar{V}. \quad (10)$$

Сознергия тела совершающего вращательное движение – это векторная величина равная произведению момента инерции тела на его угловую скорость:

$$\bar{L} = I\bar{\omega}. \quad (11)$$

Сознергия величина векторная и её направление совпадает с направлением соответствующей скорости тела.

Энергия это – способность тел производить работу [6, 11].

Энергия – (от греч. ενεργεια – действие, деятельность) мера движения взаимодействующих материальных объектов.

В механике различают потенциальную, кинетическую и полную энергии.

Потенциальная энергия – это запасённая энергия взаимодействия материальных тел.

Кинетическая энергия – это энергия движения материальных тел и механических систем.

Полная механическая энергия материального тела – это сумма потенциальной и кинетической энергий тела.

Механические энергии тела это величины относительные.

Кинетическая энергия тел, совершающих поступательное движение, определяется как скалярное произведение соответствующей сознергии и линейной скорости:

$$T = a\bar{K} \cdot \bar{V}, \quad (12)$$

где $a = \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}$ – коэффициент, зависящий от способа реализации движения тела.

Подставив в (12) значение сознергии (10), получим:

$$T = amV^2. \quad (13)$$

Из (13) следует, что кинетическая энергия тел, совершающих поступательное движение, – это скалярная величина

Кинетическая энергия тел, совершающих вращательное движение, определяется как скалярное произведение соответствующей сознергии и угловой скорости:

$$T = a\bar{L} \cdot \bar{\omega}. \quad (14)$$

Подставив в (14) значение сознергии (11), получим:

$$T = aI\omega^2. \quad (15)$$

Из (15) следует, что кинетическая энергия тел, совершающих вращательное движение, – это скалярная величина

Кинетическая энергия тел, совершающих сложное движение и механических систем, определяется суммой кинетических энергий соответствующих движений тел и всех тел, входящих в систему:

$$T = \sum T_i. \quad (16)$$

Так как кинетические энергии материальных объектов зависят от скорости, то они относительные величины.

Итак, движение материального тела (точки) можно мерить двояким образом: сознергией и кинетической энергией. Первая мера движения величина векторная, а вторая – скалярная.

Меры движения не являются причинами движения объекта. Они только позволяют или помогают эффективно исследовать частные движения материальных объектов.

Следовательно, меры движения не могут быть основными понятиями при изучении законов движения материальных объектов. Поэтому изучать движение любого материального объекта можно и без этих мер.

Все объекты Вселенной взаимодействуют между собой.

Взаимодействие – это действие объектов Вселенной, друг на друга приводящее к изменению их движения, формы, деформации, вида, состава, строя, содержания, интеллекта.

Взаимодействия разделяют на:

- 1) духовные;
- 2) социальные;
- 3) материальных тел.

В дальнейшем в настоящей работе будут рассматриваться только взаимодействия материальных объектов, так как первые два вида взаимодействий не являются предметом исследования классической механики.

Взаимодействия материальных объектов осуществляется посредством полей, в результате чего на них действуют распределенные нагрузки (давления) и моменты или между ними происходят химические реакции.

Взаимодействия материальных объектов парны, противоположно направлены и равно велики.

Взаимодействия могут приводить тела, как в движение, так и в состояние покоя.

Взаимодействия (поля) могут быть гравитационными, сильными, слабыми, магнитными, электрическими, тепловыми и биологическими.

Гравитационное взаимодействие существует между материальными телами.

Электромагнитное взаимодействие действует между телами и частицами, обладающими электрическими зарядами.

Сильное взаимодействие, действует между элементарными частицами.

Слабое взаимодействие, проявляется на расстояниях, значительно меньших размера атомного ядра.

Тепловые взаимодействия изменяют внутреннюю энергию тел.

Биологические взаимодействия возникают в результате действия живых объектов, как между собой, так и с неживыми материальными телами. Эти взаимодействия проявляются в виде чувства присутствия посторонних объектов так и в перемещении (притягивании) материальных тел.

Взаимодействующие материальные объекты накладывают ограничения на их движение. Для учёта этих ограничений в классической механике вводят понятие *связи*. Следует отметить, что в физике, при исследовании механического движения тел, понятие связи практически не применяют.

Связь – это ограничения, накладываемые на исследуемый материальный объект другими материальными объектами [1-5].

При изучении движения исследуемых объектов от связей обычно избавляются и их действия и заменяют реакциями (нагрузками и моментами), а вводимые ими ограничения на движения исследуемого объекта описывают уравнениями и неравенствами. Устраняют связи с помощью принципа освобождения от связей. Так как связи заменяют распределёнными нагрузками, моментами, силами, то можно сделать вывод, что связи и взаимодействия – это аналогичные понятия. Поэтому понятия взаимодействия вполне достаточно для исследования движения и покоя любых механических объектов. Однако в качестве синонима, при желании, можно использовать понятие *связь*.

Если при исследовании движения материальных объектов удобно избавиться от какого-либо объекта, то оказываемые им влияния можно устранить с помощью принципа освобождения от взаимодействий, а накладываемые им взаимодействия и ограничения следует заменять распределёнными нагрузками, моментами, силами и описывать соответствующими уравнениями и неравенствами.

Количественный результат взаимодействия тел главным образом определяется их массой и расстоянием между ними. При больших расстояниях взаимодействия между телами уменьшаются, но не исчезают полностью.

При исследовании движения материальных объектов обычно слабыми взаимодействиями, которые практически ни на что не влияют, пренебрегают.

Взаимодействия материальных объектов обычно разделяют на – контактные и бесконтактные.

Если объекты непосредственно взаимодействуют между собой, то такие взаимодействия считают *контактными*.

При контактном взаимодействии материальных объектов под действием силовых полей на границах их раздела возникают распределенные нагрузки или происходят химические реакции.

Если объекты взаимодействуют между собой находясь на расстоянии, то такие взаимодействия считают бесконтактными.

При бесконтактном взаимодействии материальных объектов между ними возникают поля. Действие этих полей на объекты приводится к распределенным нагрузкам и моментам.

Распределённые нагрузки и моменты могут распределяться по длине (линии), площади (поверхности) и телу (объёму).

Распределённые нагрузки, действующие на исследуемый объект, в свою очередь можно разделить на внешние и внутренние.

Внешние нагрузки являются результатом действия на исследуемый объект других взаимодействующих с ним объектов.

Внутренние нагрузки возникают в объекте в результате взаимодействия частиц, из которых они состоят.

Так как на практике анализ и расчет полей и распределённых нагрузок представляет собой сложную задачу, то с целью упрощения исследования при моделировании процессов взаимодействия тел в классической механике вводят понятия мер взаимодействия.

Меры взаимодействия:

- 1) сила;
- 2) момент силы;
- 3) момент пары сил;
- 4) импульс силы;
- 5) импульс момента силы;
- 6) импульс пары сил;
- 7) работа.

Рассмотрим эти меры.

Сила (англ. – Force) – это сосредоточенный эквивалент (равнодействующая) полей (давлений, распределенных нагрузок), посредством которых взаимодействуют между собой материальные тела.

Сил в природе не существует [6, 11]. Силы могут возникать только при взаимодействии материальных точек, так как они не имеют размеров и поэтому у них нет и не может быть силовых полей.

Сила – это искусственная математическая абстракция, возникающая в результате локализации силовых полей (давлений, распределённых нагрузок). Именно при локализации материальных тел и их полей возникают такие понятия как материальные точки и силы.

Силы взаимодействующих материальных объектов при различном распределении нагрузок, соответственно, определяются:

$$\bar{F} = \int \bar{q}(h)dh, \quad (17)$$

где F – сила; q – интенсивность распределенной нагрузки (давления); h – соответственно, длина, площадь или объём материального тела, на которое действует нагрузка.

Силы так же можно определять через:

- проекции на координатные оси:

$$\bar{F} = F_x \cdot \bar{i} + F_y \cdot \bar{j} + F_z \cdot \bar{k}, \quad (18)$$

где F_x, F_y, F_z – проекции силы на координатные оси x, y, z и $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – единичные орты, соответственно;

- силовую функцию поля $u = f(x, y, z)$:

$$F_x = \frac{\partial u}{\partial x}, F_y = \frac{\partial u}{\partial y}, F_z = \frac{\partial u}{\partial z}.$$

Сила – величина векторная, а, значит, она имеет точку приложения, направление и модуль.

Силы, как следствие взаимодействия полей, парные, равновеликие и противоположно направленные.

Следует отметить, что сила в современной деятельности человечества является одним из наиболее запутанным и неопределённым понятием. По поводу понятия сил, их природы, названий, действий, измерений было много различных споров, дискуссий, мнений [4, 5].

Практически все формулы, моделирующие известные силы, получены в результате экспериментальных исследований, следовательно, это приближенные величины.

Силы в механике можно разделить на:

- функциональные – гравитационные, тяжести, веса, тяготения, трения, инерции, реактивные, сопротивления среды, подъёмные, выталкивания, отталкивания, притяжения, поверхностного натяжения, упругости, электрические, электромагнитные;
- классификационные – внешние, внутренние, активные, реакции, слабые, сильные, сосредоточенные, распределённые;
- именные – Ньютона, Эйлера, Архимеда;
- дискуссионные – реальные, фиктивные;
- и так далее.

Отметим, что как бы не называли и не классифицировали силы, это не что иное как абстрактные понятия которые реально не существуют в природе, а, следовательно, они не могут считаться первопричинами движения материальных объектов.

Всё, что выше было сказано о силах, относится и к моментам сил (парам сил). Это объясняется тем, что моменты сил непосредственно определяются через силы:

$$\vec{M} = \vec{F} \times \vec{r}, \quad (19)$$

где \vec{r} – радиус вектор.

Импульс силы – это векторная величина равная интегралу от произведения силы на время её действия:

$$\vec{S}_F = \int \vec{F}(t) dt. \quad (20)$$

Импульс момента силы (пары сил) – это векторная величина равная интегралу от произведения момента силы на время её действия:

$$\vec{S}_M = \int \vec{M}(t) dt. \quad (21)$$

Работа – это скалярная величина, которая определяет количественный результат действия взаимодействий материальных тел при их перемещении.

При реальных исследованиях движений материальных тел и механических систем работу обычно определяют через силы и моменты сил (пары сил), соответственно, по формулам:

$$A_F = \int \vec{F}(\vec{s}) \cdot d\vec{s} \quad (22)$$

и

$$A_M = \int \vec{M}(\vec{\varphi}) \cdot d\vec{\varphi}, \quad (23)$$

где \vec{s} и $\vec{\varphi}$, соответственно, линейное и угловое перемещения исследуемого объекта.

Продифференцировав (24) и (25) найдём элементарную работу сил:

$$dA_F = \vec{F}(\vec{s}) \cdot d\vec{s} \quad (24)$$

и моментов сил:

$$dA_M = \vec{M}(\vec{\varphi}) \cdot d\vec{\varphi}. \quad (25)$$

Итак, приведённые выше основные понятия, которые применяются в классической механике, облегчают её восприятие и применение, но большинство из них не являются необходимыми для построения основ её теории.

Законы движения материальных тел и механических систем

Все материальные объекты и механические системы Вселенной, какими бы они не были сложными, состоят только из материальных тел, которые, чтобы совершать движения, определенным образом взаимосвязаны между.

Эти объекты могут иметь как одну, так и много степеней свободы.

При разработке, создании и исследовании таких объектов обязательно проводится их динамический анализ. При динамическом анализе материальных объектов используют законы Ньютона, принцип Даламбера уравнения Лагранжа II рода, общие уравнения динамики и другие уравнения, полученные из этих классических работ [1–5], которые были сформулированы только для абстрактных материальных объектов – материальной точки.

Основываясь на современных понятиях и знаниях в [14–19], сформулированы основные законы Вселенной, главные из которых приведены ниже.

Законы Вселенной

1. Вселенная одна.
2. Вселенная консервативна.
3. Материя – один из объектов Вселенной.
4. Объекты Вселенной взаимодействуют между собой.
5. Взаимодействие материальных объектов равновелики и разнонаправлены.
6. Взаимодействие объектов приводит к их движению.
7. Вселенная дуальна.
8. Все материальные объекты Вселенной одновременно движутся и покоятся.

Анализ приведённых выше законов-аксиом Вселенной показывает, что они указывают на то, что движение материальных объектов происходит в результате их взаимодействия, но эти положения не позволяют описать и найти законы их движения. Следовательно, надо сформулировать законы-аксиомы, которые позволят определять движения материальных объектов.

Так как движение материальных объектов возникает в результате их взаимодействия, то исследовать эти движения можно только с помощью мер взаимодействия. Отсюда следует вывод, что только меры взаимодействия могут быть основными понятиями при изучении законов движения материальных объектов.

Проведённый выше анализ мер взаимодействия позволяет заключить, что так как сила, момент силы, момент пары сил, импульс силы, импульс момента силы, импульс пары сил – это математические абстракции, то, естественно, они не могут быть использованы при формулировании законов – аксиом природы. Эти меры взаимодействия и построенные на них теории можно использовать только в предварительных расчётах и исследованиях, когда нет необходимости в высокой точности и надёжности результатов.

Следовательно, основной мерой взаимодействия материальных тел следует признать – работу. Работа может быть определена как непосредственно через полевые взаимодействия объектов, так и через виртуальные меры силовых воздействий – силы, моменты сил, моменты пар сил.

Законы движения

1. Все объекты Вселенной взаимодействуют между собой.
2. Взаимодействия объектов равновелики и разнонаправлены.
3. Взаимодействия тел, как и сами тела, всегда уравновешены.
4. Работа (элементарная, виртуальная) взаимодействия объектов Вселенной в любое мгновение равна нулю:

$$\sum A_{ij} = 0. \quad (26)$$

$$\sum dA_{ij} = 0. \quad (27)$$

$$\sum \delta A_{ij} = 0. \quad (28)$$

где A_{ij} – работа на исследуемом, а правильнее предшествующем исследуемому, перемещении объекта, совершаемая всеми взаимодействиями (Interactions); i – число взаимодействий; j – число степеней свободы у объекта.

Следовательно, если исследуемый объект Вселенной имеет несколько степеней свободы, то для изучения его движения необходимо записывать столько уравнений (26–28) сколько у него степеней свободы.

Для удобства дальнейшего применения уравнений (26–28) распишем их только для объекта с одной степенью свободы и в более подробном виде [18]:

$$\sum A_i + \sum A_{\Phi i} + \sum A_{Rei} = 0, \quad (29)$$

$$\sum dA_i + \sum dA_{\Phi i} + \sum dA_{Rei} = 0, \quad (30)$$

$$\sum \delta A_i + \sum \delta A_{\Phi i} + \sum \delta A_{Rei} = 0, \quad (31)$$

где $A_i, A_{\Phi i}, A_{Rei}$ – работы на исследуемом, а правильнее говорить предшествующем исследуемому, перемещении, совершаемые активными, инерционными и реактивными взаимодействиями.

Уравнения (29–31) для материальных тел и механических систем удобнее представить в следующем виде:

$$\sum A_{Fi} + \sum A_{Mi} + \sum A_{\Phi i} + \sum A_{M\Phi i} + \sum A_{Rei} + \sum A_{MRei} = 0, \quad (32)$$

$$\sum dA_{Fi} + \sum dA_{Mi} + \sum dA_{\Phi i} + \sum dA_{M\Phi i} + \sum dA_{Rei} + \sum dA_{MRei} = 0, \quad (33)$$

$$\sum \delta A_{Fi} + \sum \delta A_{Mi} + \sum \delta A_{\Phi i} + \sum \delta A_{M\Phi i} + \sum \delta A_{Rei} + \sum \delta A_{MRei} = 0, \quad (34)$$

где A_{Fi} и A_{Mi} , – работы, совершаемые активными (внешними) i -ми силами и моментами сил, соответственно; $A_{\Phi i}$ и $A_{M\Phi i}$ – работы, совершаемые i -ми силами инерции и моментами сил инерции, соответственно; A_{Rei} и A_{MRei} – работы, совершаемые i -ми реактивными силами инерции и реактивными моментами сил инерции, соответственно.

Анализ уравнений (32–34) показывает, что в них входят работы создающие как поступательные, так и вращательные движения материальных тел и механических систем. Так как исследуемые объекты в любое мгновение находятся в равновесии, то очевидно, что и работы, создающие как поступательные, так и вращательные движения в это мгновение по отдельности будут равны нулю. Тогда уравнения (32–34) можно представить в следующем виде, соответственно:

$$\begin{cases} \sum A_{Fi} + \sum A_{\Phi i} + \sum A_{Rei} = 0 \\ \sum A_{Mi} + \sum A_{M\Phi i} + \sum A_{MRei} = 0 \end{cases}; \quad (35)$$

$$\begin{cases} \sum dA_{Fi} + \sum dA_{\Phi i} + \sum dA_{Rei} = 0 \\ \sum dA_{Mi} + \sum dA_{M\Phi i} + \sum dA_{MRei} = 0 \end{cases}; \quad (36)$$

$$\begin{cases} \sum \delta A_{Fi} + \sum \delta A_{\Phi i} + \sum \delta A_{Rei} = 0 \\ \sum \delta A_{Mi} + \sum \delta A_{M\Phi i} + \sum \delta A_{MRei} = 0 \end{cases} \quad (37)$$

Следует отметить, что уравнения (26–37) записаны для тел и механических систем с одной степенью свободы. Однако они справедливы и для тел и механических систем с любым числом степеней свободы. Если исследуемый объект имеет несколько степеней свободы, то эти уравнения, соответственно, надо писать для каждой степени свободы исследуемого объекта.

Уравнения (5–37) можно, как это сделано в [19], записать и в проекциях на координатные оси прямоугольной системы координат.

Так как для уравновешенных статических систем непосредственно определить работу не представляется возможным (отсутствует перемещение), то следует воспользоваться искусственными приёмами, применяемыми в аналитической механике, а именно, переводом реакций опор во внешние силы, путём подбора соответствующих опор и определением виртуальной работы.

Тогда уравнения (37) примут вид:

$$\begin{cases} \sum \delta A_{Fi} + \sum \delta A_{Rei} = 0 \\ \sum \delta A_{Mi} + \sum \delta A_{MRei} = 0 \end{cases} \quad (38)$$

Для статических систем, на которые не действуют реактивные силы, уравнение (38) примет вид:

$$\begin{cases} \sum \delta A_{Fi} = 0 \\ \sum \delta A_{Mi} = 0 \end{cases} \quad (39)$$

Уравнения (38) и (39) позволяют находить неизвестные реакции в опорах статически определимых систем независимо друг от друга.

Найдем уравнения движения для абстрактных материальных точек и для приближённых исследований материальных тел.

Известно [11], что силы и сосредоточенные моменты сил действуют только на материальные точки и эти понятия используются при приближённых расчётах материальных тел. Для определения уравнений движения подставим в систему (36) формулы (24) и (25).

В результате получим:

$$\begin{cases} \sum \bar{F}_i \cdot d\bar{s} + \sum m \frac{d\bar{v}_i}{dt} \cdot d\bar{s} + \sum \frac{dm}{dt} \bar{V}_i \cdot d\bar{s} = 0 \\ \sum \bar{M}_i \cdot d\bar{\varphi} + \sum I \frac{d\bar{\omega}_i}{dt} \cdot d\bar{\varphi} + \sum \frac{dI}{dt} \bar{\omega}_i \cdot d\bar{\varphi} = 0 \end{cases} \quad (40)$$

Преобразуем (40):

$$\begin{cases} \sum (\bar{F}_i + m \frac{d\bar{v}_i}{dt} + \frac{dm}{dt} \bar{V}_i) \cdot d\bar{s} = 0 \\ \sum (\bar{M}_i + I \frac{d\bar{\omega}_i}{dt} + \frac{dI}{dt} \bar{\omega}_i) \cdot d\bar{\varphi} = 0 \end{cases} \quad (41)$$

Так как $d\bar{s} \neq 0$ и $d\bar{\varphi} \neq 0$, то (41) примет вид:

$$\begin{cases} \sum \bar{F}_i + m \frac{d\sum \bar{v}_i}{dt} + \frac{dm}{dt} \sum \bar{V}_i = 0 \\ \sum (\bar{M}_i + I \frac{d\bar{\omega}_i}{dt} + \frac{dI}{dt} \bar{\omega}_i) \cdot d\bar{\varphi} = 0 \end{cases} \quad (42)$$

Обозначим:

$$\sum \bar{F}_i = \bar{F}, \quad (43)$$

$$\sum \bar{V}_i = \bar{V}, \quad (44)$$

$$\sum \bar{M}_i = \bar{M}, \quad (45)$$

$$\sum \bar{\omega}_i = \bar{\omega}, \quad (46)$$

где $\bar{F}, \bar{V}, \bar{M}, \bar{\omega}$ – главные вектора соответствующих величин.

С учётом (43–46) уравнения (42) примут вид:

$$\begin{cases} \bar{F} + m \frac{d\bar{V}}{dt} + \bar{V} \frac{dm}{dt} = 0 \\ \bar{M} + I \frac{d\bar{\omega}}{dt} + \bar{\omega} \frac{dI}{dt} = 0 \end{cases} \quad (47)$$

Известно [6], что:

$$\begin{cases} m \frac{d\bar{V}}{dt} + \bar{V} \frac{dm}{dt} = \frac{d\bar{K}}{dt} \\ I \frac{d\bar{\omega}}{dt} + \bar{\omega} \frac{dI}{dt} = \frac{d\bar{L}}{dt} \end{cases} \quad (48)$$

где \bar{K} и \bar{L} , соответственно, соэнергии поступательного (10) и вращательного (11) движения материальных точек.

С учётом (48) и того, что силы инерции и реактивные силы имеют противоположное направление активным (внешним) силам, уравнения движения материальных точек (47) примут вид:

$$\begin{cases} \bar{F} = \frac{d\bar{K}}{dt} \\ \bar{M} = \frac{d\bar{L}}{dt} \end{cases} \quad (49)$$

Из системы уравнений (49) следует:

При движении тел изменение их энергии, соответственно, равно действующим на них силам и моментам сил.

Используя систему уравнений (49), можно вывести общие теоремы динамики и основные принципы механики. Например, теорему об изменении кинетической энергии.

Если принять, что масса исследуемого объекта величина постоянная, то из первого уравнения (49) следует:

$$\bar{F} = m \frac{d\bar{V}}{dt}. \quad (50)$$

Подставив (50) в (24), после преобразований получим:

$$dA = m\bar{V} \cdot d\bar{V}. \quad (51)$$

Внося $m\bar{V}$ под знак дифференциала и обозначая $\frac{mV^2}{2} = T$, найдём:

$$dA = dT. \quad (52)$$

Интегрируя (52), получим теорему об изменении кинетической энергии:

$$T_2 - T_1 = A.$$

Практическое применение полученных результатов приведено в [21, 22] и будет показано в последующих работах.

Выводы

Подводя итог отмеченному выше можно заключить:

- проанализированы, уточнены и сформулированы основные понятия классической механики;
- сформулированы законы движения материальных тел и точек;
- сформулированы законы равновесия материальных тел;

Литература

1. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. – М. : Высш. шк., 1990. – 607 с.
2. Голубев Ю.Ф. Основы теоретической механики. – М. : Изд-во МГУ, 2000. – 2-е изд. – 720 с.
3. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики. – Киев : Наук. Думка, 1989. – 864 с.
4. Харламов П.В. Очерки об основаниях механики. Мифы, заблуждения и ошибки. – Киев : Наук. думка, 1995. – 407 с.
5. Ишлинский А.Ю. Механика: идеи, задачи, приложения. – М. : Наука, 1985. – 624 с.
6. Смелягин А.И. Аксиомы или законы движения сформулировал и Ньютон // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2014. – № 2. – С. 11–16.
7. Галилео Галилей. Избранные труды в двух томах. – М. : Наука, 1964.
8. Ньютон Исаак. Математические начала натуральной философии. – М. : Наука, 1989. – 688 с.
9. Эйлер Л. Основы динамики точки. – М. – Ленинград : НТИ-НКТП СССР, 1938. – 500 с.
10. Смелягин А.И. Законы и понятия классической механики // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2011. – № 3. – С. 21–27.
11. Смелягин А.И. Основные, первичные понятия механики // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2014. – № 2. – С. 17–26.
12. Смелягин А.И. Объекты, для которых сформулированы аксиомы или законы классической механики // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2014. – № 1. – С. 21–25.
13. Кирсанов М.Н. Конспект лекций по динамике. – URL : <http://termech.mpei.ac.ru/kir/PDF/DNLD/din1.pdf> (дата обращения: 05.04.14).
14. Смелягин А.И. Теория механизмов и машин. – М. – Новосибирск, ИНФРА-М, 2008. – 263 с.

15. Смелягин А.И. Теория механизмов и машин : Курсовое проектирование. – М. : ИНФРА-М, 2019. – 263 с.
16. Смелягин А.И. Структура механизмов и машин. – М. : Высш. шк., 2014. – 304 с.
17. Структура машин, механизмов и конструкций. – М. : ИНФРА-М, 2019. – 387 с.
18. Смелягин А.И. Применение аналогов скоростей для исследования механических систем вращательного движения // Научные труды КубГТУ. – Краснодар : Изд. КубГТУ, 2016. – № 10. – С. 125–139.
19. Смелягин А.И. Важнейшие аксиомы, следствия и теоремы классической механики // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2017. – № 3. – С. 21–38.
20. Смелягин А.И. Об аналогах скоростей и ускорений // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2019. – № 4.– С. 19–25.
21. Смелягин А.И. Применение новых аксиом и следствий для исследования механических систем вращательного движения // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – Краснодар: издательский Дом – Юг, 2015. – № 3. – С. 19–27.
22. Смелягин А.И. Динамический анализ трехподвижного манипулятора // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – Краснодар : издательский Дом – Юг, 2019. – № 1.– С. 23–30.

References

1. Nikitin N.N. Course of theoretical mechanics. – M. : Vysh. shk. 1990. – 607 p.
2. Golubev Y.F. Fundamentals of theoretical mechanics. – Moscow: Moscow State University Publishing House, 2000. – 2nd ed. – 720 p.
3. Kuzmichev V.E. Laws and Formulas of Physics. – Kiev : Science. Dumka, 1989. – 864 p.
4. Kharlamov P.V. Essays on the fundamentals of mechanics. Myths, misconceptions and mistakes. – Kiev : Science, Dumka, 1995. – 407 p.
5. Ishlinsky A.Yu. Mechanics: ideas, tasks, applications. – M. : Science, 1985. – 624 p.
6. Smelyagin A.I. Axioms or Laws of Movement formulated by Newton // Science. Technique. Technologies (Polytechnic Bulletin). – Krasnodar : Publishing House – South, 2014. – № 2. – P. 11–16.
7. Galileo Galilei. Selected works in two volumes. – M. : Science, 1964.
8. Newton Isaac. The Mathematical Beginnings of Natural Philosophy. – M. : Science, 1989. – 688 p.
9. Euler L. Basics of Dynamics of the Point. – M. – Leningrad : NTI-NCTP USSR, 1938. – 500 p.
10. Smeliagin A.I. Laws and concepts of classical mechanics // Science. Technique. Technologies (Polytechnic Bulletin). – Krasnodar : Publishing House – South, 2019. – № 3. – P. 21–27.
11. Smeliagin A.I. Basic, primary concepts of mechanics // Science. Technique. Technologies (polytechnical bulletin). – Krasnodar : Publishing House – South, 2014. – № 2. – P. 17–26.
12. Smeliagin A.I. Objects for which the axioms or laws of classical mechanics are formulated // Science. Technique. Technologies (Polytechnic bulletin). – Krasnodar : Publishing House – South, 2014. – № 1. – P. 21–25.
13. Kirsanov M.N. Lecture notes on dynamics. – URL : <http://termech.mpei.ac.ru/kir/PDF/DNLD/din1.pdf> (date of address : 05.04.14).
14. Smelyagin A.I. Theory of mechanisms and machines. – M. – Novosibirsk, INFRA-M, 2008. – 263 p.
15. Smeliagin A.I. Theory of mechanisms and machines : Course design. – M. : INFRA-M, 2019. – 263 p.
16. Smeliagin A.I. Structure of mechanisms and machines. – M. : Supreme Shk., 2014. – 304 p.
17. Structure of Machines, Mechanisms and Structures. – M. : INFRA-M, 2019. – 387 p.
18. Smeliagin A.I. Application of the speed analogs for investigation of the mechanical systems of the rotational motion // Proc. of Kuban State Technical University. – Krasnodar : Proc. of Kuban State Technical University, 2016. – № 10. – P. 125–139.
19. Smeliagin A.I. The most important axioms, consequences and theorems of classical mechanics // Nauka. Technique. Tekhnologiya (Polytechnical bulletin). – Krasnodar : Publishing House – South, 2017. – № 3. – P. 21–38.
20. Smeliagin A.I. About the analogues of speeds and accelerations // Science. Technique. Technologies (Polytechnical bulletin). – Krasnodar : Publishing House – South, 2019. – № 4.– P. 19–25.
21. Smeliagin, A.I. Application of the new axioms and consequences for investigation of the mechanical systems of the rotational motion // Science. Technique. Technologies (Polytechnic bulletin). – Krasnodar : Publishing House – South, 2015. – № 3. – P. 19–27.
22. Smeliagin A.I. Dynamic analysis of a three-moving manipulator // Science. Technique. Tekhnologiya (Polytechnic bulletin). – Krasnodar : Publishing House – South, 2019. – № 1.– С. 23–30.