

В.Л. Крупенин

Механика - первая глава физики

Учреждение Российской академии наук институт машиноведения

им. А.А. Благодатова РАН

**Механика XXI века.** В конце прошлого века триста лет со дня первого опубликования свет великой книги Исаака Ньютона «Математические начала натуральной философии». Резюмируя труды Г. Галилея и других своих замечательных предшественников, равно как, разумеется, и свои собственные, Ньютон возвел фундамент под тем, что ныне именуется физикой. Правда, в те времена физика в основном и состояла из этого фундамента — механики. Великие открытия, на которые и опирается современное знание о природе пришли позже.

Прошли годы, но механика и сегодня остается одной из основополагающих отраслей науки. Она развивается, генерируя все новое и новое знание. От скорейшего решения многих проблем механики, от эффективного внедрения в практику ее фундаментальных разработок во многом зависит благосостояние человечества.

Занимается механика, если говорить вообще, изучением движения материальных тел под действием разнообразных сил. Предполагается, что тела эти не слишком малы (микрочастицы) и не двигаются слишком быстро (их скорости существенно меньше скорости света). Таким образом, пока существуют материальные тела и возникающие вследствие их различных взаимодействий силы, предмет механики исчерпан быть не может.

Механика XXI века существенно отличается от механики XVII. Усиливающаяся тенденция к узкой специализации научных областей, естественно, коснулась и ее. Перечень разделов современной механики поэтому весьма широк: теоретическая механика, механика твердого деформируемого тела, гидро- и аэромеханика, механика полимеров и композитов, теория механических колебаний и т. д. и т. п. Проблемы же, которыми она занимается, естественно, очень и очень далеки от тех, которыми интересовался Ньютон. Например, понятие «механическое движение» нуждается в существенных оговорках и уточнениях. Например, изучать поведение механических объектов, не учитывая свойств материалов, часто оказывается бессмысленным. Например, в далекие времена ученые и инженеры вполне могли обходиться представлением об абсолютно твердом теле — некоем идеальном объекте, недеформируемом во время своего движения, ныне же специальная теория относительности утверждает, что абсолютно твердых тел не бывает и быть не может. Ну и так далее.

Список изменений, которые произошли в механике за три столетия ее существования,

настолько обширен, что для его обсуждения потребовалось бы многотомное издание. Целесообразно поэтому рассказать о некоторых конкретных проблемах, решение которых сулит современной технике очень много.

**Проблема «рассчитать».** Символами инженерного труда еще недавно представлялись штангенциркуль и логарифмическая линейка. Штангенциркуль — для измерений, логарифмическая линейка — для расчетов. Расчет и измерение — основа основ техники. Что же такое расчет в современном понимании?

Технические объекты, окружающие нас повсюду, — машины, механизмы, разнообразные устройства, аппараты, приспособления, как правило, достаточно сложны. При их создании конструктор опирается в первую очередь на свой опыт и инженерную интуицию. Создание машины — процесс творческий, родственный в чем-то искусству (слово «механика» в переводе с греческого и означает как раз «искусство построения машин»).

Сегодня основные требования к любой машине — высокие эффективность, производительность, быстрдействие, надежность и экономичность. Все эти требования легко сформулировать на словах, но не так легко воплотить «в железе». Современная механика позволяет синтезировать математические модели технических объектов, а значит, дает возможность заранее установить их свойства, представить себе их достоинства или возможные недостатки, узнать, как настраивать машину в режим максимальной эффективности.

Необходимость математического моделирования механических процессов обусловила высокую степень математизации механики. Настолько высокую, что некоторые даже смотрят на нее как на раздел математики (в Московском университете нет весьма, казалось бы, нужного механико-физического факультета, но есть механико-математический). Иногда механика действительно выглядит чересчур формальной. Ряд исследований, объявляемых «механическими», на деле выглядят оторванными от реальных объектов и изучают не явления, а свойства математических моделей. Это, возможно, и поучительно, но никак не соответствует инженерным целям.

Вернемся, однако, к проблеме «рассчитать». Раньше требовалось, например, ответить на вопросы: каковы прочностные качества данной конструкции или узла, какими должны быть параметры механизмов, реализующих заданный тип движения, и т. п., «расчленивающие» единое восприятие сложной системы и часто «вместе с водой выплескивающие и ребенка».

Нынешняя техника имеет дело с огромными скоростями и нагрузками. Инженеры стремятся заставить машины работать в форсированных режимах, и это обстоятельство

предъявляет к расчетам иные требования. При проектировании машина должна рассматриваться как единая динамическая система «привод (источник энергии) — система управления — исполнительные устройства — внешняя (обрабатываемая) среда». О динамически обоснованных принципах организации машин можно говорить, только когда инженер будет знать все параметры этой сложной системы.

Требования, которым должны удовлетворять математические модели, сложны и выглядят на первый взгляд достаточно противоречиво. С одной стороны, они должны быть высокоинформативными, т. е. содержать сведения о всех основных подсистемах объекта. С другой — позволять получить результаты достаточно легко интерпретируемые на «технический язык»: модели, «перегруженные» избыточной информацией, могут оказаться столь же бесполезными, сколь и «недогруженные». Однако никакого противоречия здесь нет. Процесс построения математических моделей технических систем базируется на достаточно простых и целесообразных принципах. Владеть ими должен каждый грамотный инженер.

Фундаментальные исследования последних лет дают рекомендации как по проведению математического моделирования, так и по анализу построенных моделей. Как правило, математические модели выражаются при помощи дифференциальных уравнений. Поэтому проблема «рассчитать» часто сводится к необходимости разыскать их решения. Дифференциальные уравнения, описывающие реальные динамические процессы, по большей части нелинейны. Это означает, что получить искомые точные решения невозможно. Приходится довольствоваться приближенными решениями, которые удовлетворяют исходному дифференциальному уравнению с некоторой погрешностью.

Общеизвестна роль, которую играет вычислительная техника, однако численные решения, несмотря на их высокую точность, устраивают инженеров далеко не всегда. Очень часто для того, чтобы получить возможность взглянуть на изучаемый объект в целом, инженер стремится получить знание об исследуемых процессах в аналитическом — «формульном» (даже в ущерб точности) — виде. Аналитические исследования, как правило, проводят, что называется, «вручную, на бумаге». Впрочем, в последние годы и этот труд во многом автоматизирован.

Однако все равно, компьютер ли выступает в роли расчетчика или человек, в любом случае нужны алгоритмы расчета. Эффективные средства анализа математических моделей — так называемые асимптотические методы нелинейной механики, предложены в тридцатые годы нашими знаменитыми учеными Н. М. Крыловым и Н. Н. Боголюбовым. А еще ранее сходными по существу идеями пользовался при выполнении многочисленных практических расчетов не менее знаменитый голландец Б. Ван-дер-Поль, популяризации и

обобщению работ которого в немалой степени способствовали труды основателя советской школы теории колебаний (и множества разделов физики) Л. И. Мандельштама и его ученика Н. Д. Папалекси.

Как правило, большинство динамических процессов можно разделить на две составляющие — медленную эволюционную и малую осцилляционную («колебательную»). Медленная составляющая отвечает за общий вид процесса и определяет его основные качества. Поэтому целесообразно пренебречь малыми «колебательными» добавками, наложенными на медленно изменяющуюся эволюционную составляющую и описывать динамику исследуемой системы только при ее помощи. Эта идея реализуется при посредстве асимптотических методов. Получаемые таким образом решения, разумеется, не точны, а приближенны. Однако в них нет избыточной информации, - они в ряде случаев более полезны в инженерной практике, чем точные. Это несколько парадоксальное обстоятельство объясняется достаточно просто.

Во-первых, никакая математическая модель не может «подходить» к реальному объекту идеально, так сказать, «на все сто». На практике часто оказывается, что, жертвуя излишней точностью, мы избавляемся не от ценной информации о состоянии объекта, а от его малых несоответствий математической модели.

Во-вторых, даже если неучитываемые при использовании асимптотических методов малые осцилляции и существуют на самом деле, то информация о них при решении многих практических задач просто-напросто неважна. Например, мы собираемся переложить спичечный коробок из одного места в другое: для ответа на большинство вопросов о механике рассматриваемого процесса нет никакой надобности учитывать дрожание кисти руки относительно ее «основной» траектории.

Асимптотические методы дают возможность получить представления, позволяющие описывать (если в этом есть необходимость) и малые отбрасываемые вначале осцилляции. Надо сказать, что к таким описаниям механики прибегают довольно редко. В большем числе случаев необходимая информация «извлекается» из модели и без того.

Асимптотические и другие приближенные методы нелинейной механики появились, естественно, не на «ровном месте». Идеи, связанные с применением приближенных расчетов, в той или иной форме использовались ранее К. Ф. Гауссом, М. В. Остроградским и многими другими классиками естествознания. Не пренебрегал ими и сам И. Ньютон, который, рассчитывая величину затухания малых колебаний маятника при произвольном законе сопротивления среды, получил соотношение, всецело совпадающее с тем, что дают ныне асимптотические методы.

Приближенные расчетные методы механики — прекрасный пример того, как на первый

взгляд абстрактные идеи («здание» асимптотических методов базируется на ряде весьма нетривиальных математических фактов) при надлежащей интерпретации могут использоваться практиками. Список практически значимых задач, решенных при помощи приближенных методов, огромен. Это и расчеты в области небесной механики (определение параметров движения небесных тел и космических аппаратов), и задачи современной механики композиционных материалов (определение эффективных характеристик композитов, прогнозирование их свойств и др.), и решение многих важных проблем теории управления машинами (промышленными роботами, различными технологическими установками и многими другими).

Методы нелинейной механики помогли прочно «встать на ноги» теории колебаний — науке с множеством прикладных разделов, изучающей систематически повторяющиеся динамические процессы в машинах и механизмах, Мировом океане, плазме, радиоэлектронных устройствах, биологических системах и т.д.

Одно из важнейших прикладных направлений теории механических колебаний (им занимаются в Институте машиноведения РАН и других ведущих академических и отраслевых научно-технических центрах России) — вибротехника. Ее дело, в частности, расчет и настройка вибрационных технологических машин. В качестве вычислительного аппарата она активно «эксплуатирует» асимптотические и другие приближенные методы расчета. Вот пример одной важной проблемы, успешно решаемой при их помощи.

Вполне естественно желание «заставить» вибромашину работать максимально эффективно и производительно. Успех в решении этой задачи зависит от наличия еще на стадии проектирования информации о возможных резонансных свойствах машины. Дело в том, что резонанс и есть то состояние, когда при минимуме затрат получают максимальный технологический эффект. Вот здесь-то поистине незаменимы физически ясные и легко интерпретируемые на «технический язык» рабочие формулы, полученные приближенными методами нелинейной механики. Инженер, исходя из условий поставленной задачи, четко видит динамические особенности используемых им процессов, наилучшим образом выбирает параметры конструкций, с максимальной полезностью распоряжается энергией привода, словом, создает действительно динамически целесообразную машину.

**Экспериментальная механика.** То, что физики делятся на теоретиков и экспериментаторов, знают все. Механиков же практически всегда представляют только теоретиками и о механических экспериментах знают мало. Этому обстоятельству способствует явное «перетеоретизирование» механики. Между тем экспериментальные работы в механике зачастую более важны для практики, и инженерного дела, чем

теоретические. Впрочем, считаться, кто важнее — теоретик или экспериментатор,— бессмысленно. И тот и другой занимается наукой.

У экспериментаторов, разумеется, есть свои преимущества. Как известно, ни один из экспериментов не может подтвердить теорию (но может находиться с нею в удовлетворительном согласии); в то же время единственного эксперимента может оказаться достаточно, чтобы теория пала.

Однако, казалось бы, что принципиально нового можно обнаружить в природе механического движения? Законы механики установлены давно, они, естественно, подтверждены экспериментально; определены границы их применимости. Чего же еще? Оказывается, проблем осталось много.

Возьмем, например, механику твердого деформируемого тела. Она интересуется движением (или, в частности, равновесием) разнообразных твердых тел, возникающим в результате внешних воздействий различной природы и «выходит на сцену» тогда, когда модели и представления, связанные с абсолютно твердым телом, не применимы и пренебрегать деформациями нельзя. (Несмотря на то что абсолютно твердых тел не бывает, механики часто прибегают к этой идеализации и, надо сказать, с успехом.)

Поведение деформируемых тел может оказаться довольно сложным и определяться множеством причин. Под действием внешних силовых и кинематических возмущающих факторов в телах возникают определенные распределения напряжений, деформаций, скоростей частиц, а также магнитных, электрических и температурных полей. «Увязка» этих многочисленных характеристик по вполне понятным причинам чрезвычайно важна при создании машин и других технических объектов.

Модели механики твердого деформируемого тела состоят из трех групп соотношений. Вначале идут уравнения движения (или, в частности, равновесия). Эти уравнения — основа основ механики — базируются на общих для всех систем фактах и в экспериментальном обосновании не нуждаются. Далее идут геометрические уравнения совместности деформаций. Их достаточно легко сформировать чисто умозрительно. Наконец, третья группа несет информацию о свойствах материала, устанавливает соотношения между напряжениями и деформациями — это так называемые физические или определяющие уравнения.

Определяющие соотношения — «сердце любой» модели механики деформируемого тела. Но здесь не обойтись без эксперимента, который установит необходимые для моделирования свойства материала. Простейшее определяющее соотношение — всем известный линейный закон Гука. Если установлено, что материал, из которого изготовлен некоторый образец, при данных внешних условиях подчиняется закону Гука и,

кроме того, найдены конкретные значения некоторых физических констант, то появляется возможность полностью описать поведение образца. Однако такое предположение может и не подтвердиться экспериментально: известно большое число «негуковских» материалов и внешних условий, при которых линейный закон Гука не выполняется. В этом случае необходимо установить новые физические соотношения и результаты описания, естественно, качественно изменятся.

Нахождением определяющих уравнений занимались всегда. Но особенно остро эта проблема встает в наши дни. Материалам приходится «работать» в экстремальных условиях, в присутствии сильных внешних полей — не знать их свойств значит не иметь эффективной техники. Кроме того, материаловеды «открывают» новые полимерные и композитные материалы чуть ли не ежедневно, что позволяет приблизиться к решению совершенно фантастической проблемы — каждой детали подобрать материал, соответствующий ее назначению наилучшим образом. Однако полимеры и композиты подчиняются закону Гука довольно редко, поэтому экспериментирование с ними особенно интересно и важно.

Перед экспериментальной механикой стоят и многие другие задачи. Одна из них — регистрация механических эффектов. Эффект — это не физический закон, а некое частное проявление законов на конкретном классе объектов. Иногда эффекты открывают теоретики. Они анализируют какую-либо математическую модель и узнают, что при некоторых значениях параметров в исследуемой системе должны возникнуть некоторые явления. Проявившись эти явления в реальных конструкциях, они могут, например, привести к их быстрому разрушению или, наоборот, предохранить от преждевременного износа.

Экспериментатор должен дать заключение: существует ли указанный теоретиком эффект на самом деле или в силу каких-либо факторов, реально присутствующих, но не «включенных» в модель, обнаружить его не удастся. Естественно, ход событий может быть и обратным: неизвестные явления проявляются вначале в эксперименте, а уже потом получают объяснение. Так, например, было со многими интересными эффектами, связанными с ползучестью металлов; появлением своеобразных свойств «памяти» о предшествующих нагружениях у ряда материалов; возникновением связей между намагничиванием, остаточной деформацией, электрическим сопротивлением, температурой и упругими постоянными. Этот список можно существенно расширить. Знание механических эффектов чрезвычайно важно для техники. Их используют изобретатели, они лежат в основе рекомендаций по конструированию машин.

Колебательные, вибрационные процессы встречаются практически в любой машине. Иногда их используют в качестве рабочих процессов или осуществляют рабочие процессы с их помощью. Но иногда они ведут машину к преждевременной гибели — это связано с

виброизносом. Знать причины, вследствие которых возникает виброизнос, и уметь их устранять — значит существенно продлить жизнь техническим средствам. Знать условия возникновения интенсивных вибрационных процессов и уметь их реализовывать — значит существенно повысить эффективность многих технологических процессов.

Про механические эффекты, сопровождающие вибрационные процессы, можно говорить много и долго. Оказывается, что если поместить некоторые конструкции в сильные вибрационные поля, то они моментально могут просто «рассыпаться». Оказывается, что при некоторых условиях эти же поля, напротив, способны превратить неустойчивую систему в устойчивую. Оказывается, что если подвергнуть интенсивной вибрации сыпучую среду (порошок, грунт, зерно и т. п.), то в ней возникает интенсивное движение частиц с перемешиванием, напоминающее кипение. Оказывается, что если заставить вибрирующую струну соударяться с неподвижной стенкой, то стоячая волна синусоидальной формы мгновенно трансформируется в трапециевидную. В общем, много чего оказывается...

Большую работу по изучению механических эффектов в разнообразных колебательных системах ведут сотрудники лаборатории вибротехнических систем Института машиноведения РАН. Под руководством доктора технических наук В.К. Асташева были проведены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, закончившиеся разработкой научных основ проектирования авторезонансных вибрационных машин.

Авторезонанс — это резонанс под действием силы, порождаемой движением самой системы. Авторезонансные машины (а среди них — и ультразвуковые технологические установки, и даже цикловые автоматические манипуляторы) «умеют» вполне самостоятельно выбирать для своей работы максимально эффективный и производительный режим. Это достигается благодаря только механическим эффектам. Дорогостоящие управляющие системы оказываются ненужными. В настоящее время авторезонансными машинами заинтересовались некоторые промышленные предприятия и, будем надеяться, скоро они займут в арсенале технических средств подобающее им место.

Режимы движения, которые могут возникнуть в сходных колебательных системах, отличаются большим разнообразием. Авторезонансные режимы характеризует высокая степень «правильности» и упорядоченности (именно поэтому, в частности, при их реализации и достигается высокая технологическая эффективность). Вместе с тем существуют колебательные системы, которые даже под действием сил вполне регулярной природы ведут себя довольно странно: при достижении их параметрами определенных значений упорядоченные движения исчезают и режим колебаний оказывается случайным. Этот эффект был вначале обнаружен при математическом моделировании одной автоколебательной системы, а затем выяснилось, что количество объектов, способных генерировать хаос,



весьма велико. Изучая их, ученые надеются объяснить ряд пока еще не получивших достаточного теоретического обоснования физических явлений. Таких, например, как турбулентность.

Оказалось, что эффект возникновения случайных механических колебаний из-за действия «неслучайных» внешних источников проявляется в эксперименте. При этом его можно и использовать. Чтобы повысить надежность технических систем, для них устраивают предварительные вибрационные испытания. То есть еще до начала эксплуатации на системы воздействуют интенсивными виброполями, примерно такими же, с какими им предстоит встретиться в реальных условиях. Реальная вибрация часто имеет случайный характер и это, естественно, должно найти отражение и в программе виброиспытаний. Современная аппаратура, позволяющая воспроизводить случайные колебания, дорога и труднодоступна. Настолько, что пока, к сожалению, многие наши предприятия, на которых проводятся массовые испытания, обходятся без нее. Вот здесь-то и пригодится устройство для возбуждения случайных колебаний, предложенное ИМАШ АН СССР и ленинградским производственным объединением «Звезда». Реализуя упомянутый эффект возникновения случайной вибрации, это устройство может быть использовано для соответствующих виброиспытаний. Причем стоимость их должна резко упасть: здесь опять-таки умение распорядиться механическим эффектом избавляет от необходимости привлекать дорогостоящие средства.

Успехи современной экспериментальной механики обусловлены широким использованием высокоточной и сверхчувствительной регистрирующей, измерительной и воспроизводящей аппаратуры: разнообразных осциллографов, самописцев, измерителей, анализаторов спектра, датчиков, электронных микроскопов, генераторов, вибровозбудителей, специализированных компьютеров и т.п. Появление подобных приборов связано с достижениями различных отраслей техники, и в первую очередь электронной. Время «механических ухищрений» при проведении механических экспериментов прошло.

Сейчас возможности экспериментальной механики позволяют думать о задачах качественно нового уровня. Например, станет возможным синтезировать два основных способа моделирования механических систем — математический и экспериментальный. Мы уже говорили, что математическая модель (система дифференциальных уравнений движения) — это абстракция, не всегда и не во всем адекватная реальной системе. Однако сила математического моделирования в его «предсказательности». Коль скоро такая модель создана, мы можем на ее основе получить достаточно полный прогноз состояния системы в будущем. Если же экспериментировать со сложными техническими объектами, то определяются лишь некоторые параметры их состояния в данный момент времени, получить

же глобальный прогноз поведения — не просто.

Возможности современной измерительной и анализирующей аппаратуры позволяют предложить специальные методы построения математической модели по результатам натуральных измерений. Речь идет не об определении каких-либо неизвестных параметров системы, а именно о самой модели в целом. Иными словами, появляется возможность «измерить уравнения движения».

Это высказывание, разумеется, чудовищно некорректно: уравнения нельзя измерять. Но можно экспериментально определить некоторые характеристики (их называют динамическими податливостями), которые вполне заменят уравнения и которые в определенном смысле даже более информативны. Знание реальных динамических податливостей и еще некоторых экспериментально определяемых характеристик позволяет существенно ослабить роль «умозрительного фактора» при математическом моделировании. В то же время используются его основные преимущества, например, возможность прогнозировать поведение реальных конструкций.

Дело это непростое. И пока здесь наметились лишь первые, хотя и обнадеживающие, результаты. Однако если исследования в этой области будут успешно развиваться, то смогут стать на научные рельсы весьма важные работы в области диагностики машин. Пока же они большей частью основываются не на законах механики, а на обработке результатов некоторых опытов, что, вероятно, и бесполезно, но вряд ли соответствует их действительным целям.

**Механика будущего.** Фантазировать о том, какой станет та или иная наука в будущем,— занятие неблагодарное. Еще недавно физики «бредили» высокотемпературной сверхпроводимостью, и, казалось, ее получение — дело далекого будущего, а ныне эта мечта уже «материализовалась». Так и с любой другой наукой, и с механикой в том числе.

Вполне естественно, что в будущем будут развиваться и традиционные отрасли механики, и те ее разделы, контуры которых еще только проявляются. Наверняка возникнут и многие новые направления. В XXI в. механика освободится от ряда феноменологических представлений, в связи с чем получат существенно более глубокое, нежели теперь, физическое осмысление такие важнейшие механические явления, как удар, турбулентность, пластичность, текучесть, разрушение, рассеяние энергии за счет внутренних несовершенств материалов, и многие другие. В будущем должна окончательно оформиться и «встать на ноги» так называемая мезомеханика — наука, призванная, в частности дать описание механическим свойствам наноструктур.

До сих пор в механике господствует ньютоновская теория удара: при соударении двух шаров какая-то доля их кинетической энергии сохраняется и поэтому шары разлетаются, а

какая-то — теряется и поэтому шары нагреваются сами и нагревают окружающую среду. Эта теория не дала ответа, как найти эту «какую-то долю». Ньютон полагал, что существует некоторый, определяемый из опыта, постоянный коэффициент, который «регулирует взаимоотношения» между сохраняемой и потерянной частями энергии. При помощи гипотезы Ньютона были с успехом решены многие практически значимые задачи; используется она и теперь. Однако уже накопилось большое число примеров, когда, применяя ее, механики не в состоянии выполнить физически корректные расчеты. Новый «более физичный» взгляд на удар поможет и в создании высоконадежных теплообменных аппаратов для разнообразных энергетических установок, и при конструировании эффективных резонансных машин, и при проведении мероприятий по снижению шума двигателей внутреннего сгорания.

Думая о механике конца XXI в., нельзя не сказать и о будущих технологиях. Нет сомнений: здесь произойдут радикальные перемены и на смену традиционным принципам придут новые. Собственно говоря, новые технологии уже начинают внедряться — ультразвуковая, лазерная, ионо-плазменная; технологии, использующие эффекты сверхвысоких давлений... Все это не только завтрашний день, но и сегодняшний.

Иногда, когда хотят подчеркнуть прогрессивность новых технологий, их, в противовес старым, величают «немеханическими». Такой взгляд наивен. Во-первых, механические процессы, используемые в качестве рабочих, еще далеко не исчерпали себя. Другое дело, что механика должна дать рекомендации, как с максимальной полезностью этими процессами распорядиться. Упомянутые выше авторезонансные машины как раз и являют собой пример резкого повышения эффективности, в общем-то, традиционных технологических машин. Во-вторых, всякий технологический процесс един. Какими бы способами ни получали детали, еще долгое время машины будут собирать. Сборка (как и многие другие производственные операции) — «епархия» механики, которая должна сформулировать новые принципы конструирования машин-автоматов, будь то робототехнические комплексы или роторно-конвейерные линии.

Разделять технологии на «механические» и «немеханические» некорректно еще и потому, что во многих случаях для получения необходимого технологического эффекта, механические и немеханические динамические процессы призваны работать совместно. Вот простой, но далеко не единственный пример. Хорошо известно, насколько важны для промышленности лазерные технологии. Световые лучи, генерируемые мощными лазерными установками, применяются, например, при сварке, резке и термообработке металлов. При этом, естественно, лучи должны двигаться точно по намеченным траекториям - сканироваться. В настоящее время известно немало разнообразных методов сканирования, и среди них одно из важнейших мест занимают оптико-механические. Это

обусловлено возможностью получать при посредстве механических приспособлений относительно небольшие частоты движения луча (диапазон — от единиц до тысяч герц), а именно такие частоты в ряде случаев наиболее важны.

Словом, пока есть то, что зовут «механическими телами» (а как представить мир без них?), механика останется одной из важнейших научных дисциплин. Новые успехи самой старой области физики впереди.