11. Хайруллина И.Р., Кашаев Р.С. Исследование методом ядерного магнитного резонанса влияния серы на свойства топлив // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2008. – №3-4. – С. 65-77.

12. KashaevR.S.-H. , Gazizov E.G. Effect of irradiation in visible and infrared spectral regions on nuclear magnetic relaxation parameters of protons in oil products. Journal of Applied Spectroscopy. – V. 77 (3). – P. 321-328.

ИНЖЕНЕРНЫЕ НАУКИ НА РУБЕЖЕ ВЕКОВ: СИНТЕЗ И МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНОСТЬ

Крупенин В.Л.

Учреждение Российской академии наук, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Не так давно исполнилось триста лет со дня появления на свет великого труда основателя современной физики Исаака Ньютона «Математические начала натуральной философии». Обобщая труды своих великих предшественников, равно как, разумеется, и свои собственные, Ньютон возвел фундамент под той областью человеческого знания, которая ныне именуется физикой. Правда, в те времена физика в основном и состояла из этого фундамента – механики. Но затем пришли великие открытия, на которые и опираются современные знания о Природе. Среди этих знаний, возможно, как-то затушевалось представление о том, что слово «механика», в переводе с древнегреческого собственно и означает «искусство построения машин». То есть механика первоначально была фундаментом инженерного дела, а потом физики. Гений Ньютона дал возможность взглянуть на науку 17-го века с единых позиций. Затем началось Великое Разобщение: разделы физики создавались, «становились на ноги» и, казалось, начинали жить своей самостоятельной жизнью, однако, теперь видно: пришло «время собирать камни». Инженерные науки впитали в себя огромную часть, казалось бы, ставших далекими друг от друга разделов физики и именно они активно участвуют в осуществлении синтеза знаний, определяя единство науки, по крайней мере, в ее прикладной области и в реальном производстве. Рассмотрим подробнее некоторые конкретные проблемы, стоящие перед современными инженерами.

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, приборы, приспособления, как правило, достаточно сложны. При их создании конструктор опирается в первую очередь на свой опыт и инженерную интуицию, которая не всегда надежна.

Сегодня основные требования к любой машине – высокие эффективность, производительность, быстродействие, надежность и экономичность. Все эти требования легко сформулировать на словах, но не так легко воплотить «в железе». Современное инженерное дело 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. 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., «расчленяющие» единое восприятие сложной системы и часто «вместе с водой выплескивающие и ребенка».

Сегодня 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 физически обоснованных принципах организации машин можно говорить, только когда инженер будет знать все параметры этой сложной системы и здесь «задействуется» и классическая, и современная физика, а также некоторые частные «ответвления». Такой подход довольно далеко уводит «механику» от «истоков», но именно так устроен мир!

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 и, возможно, каких-либо дополнительных соотношений. 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 в большинстве случаев – невозможно. Приходится довольствоваться приближенными решениями, которые удовлетворяют исходному дифференциальному уравнению с некоторой погрешностью.

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 Н.М. Крыловым и Н.Н. Боголюбовым. А еще ранее сходными по существу идеями пользовался при выполнении многочисленных практических расчетов знаменитый голландский ученый Б. Ван-дер-Поль, популяризации работ которого в немалой степени способствовали труды основателя советской школы теории колебаний и многих отраслей 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. 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.

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 – прекрасный пример того, как на первый взгляд как 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 современного материаловедения композиционных материалов (определение эффективных характеристик композитов, прогнозирование их свойств наноматериалов и др.). Здесь и решение многих важных проблем теории управления машинами (промышленными роботами, различными технологическими установками и многими другими), и расчеты разнообразных электронных, например, СВЧ устройств.

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 – 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» вибромашины 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.

Нельзя также не отметить, что в последние годы интенсивно развивается так называемая физическая мезомеханика материалов, объединяющая основные методы и принципы физики пластичности и разрушения с механикой деформируемого твердого тела. Мезомеханика оказалась тесно связанной с механизмами нанотехнологий. Это весьма интересная и перспективная область знания.

Эксперимент в инженерном деле. То, что физики делятся на теоретиков и экспериментаторов – общеизвестно. Инженеров же практически всегда представляют только производственниками и об инженерных экспериментах знают мало. 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 инженерного дела? Законы, на которых оно построено, как правило, устанавливаются еще на стадии чисто научных исследований, они, естественно, подтверждены экспериментально; определены границы их применимости. Чего же еще? Оказывается, проблем осталось много. Возьмем, например, динамику 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, так что пренебрегать деформациями нельзя. (Несмотря на то что абсолютно твердых тел не бывает, инженеры и 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 об «инженерных» 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 соотно-

шения 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 экспериментаторами в инженерном деле стоят и многие другие задачи. Одна из них – регистрация физико-технических эффектов. Эффект – это не физический закон, а некое частное проявление законов на конкретном классе объектов. Знание физико-технических эффектов чрезвычайно важно для техники и технологий. Их используют изобретатели, они лежат в основе рекомендаций по конструированию машин, приборов и аппаратуры.

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 так называемым 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, эффектов много.

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

Дальше. Фантазировать о том, каким станет инженерное дело в будущем,– занятие неблагодарное. Еще недавно физики «бредили» высокотемпературной сверхпроводимостью и, казалось, ее получение – дело далекого будущего, а ныне эта мечта уже «материализовалась». Вполне естественно, что в будущем будут развиваться и традиционные отрасли инженерного дела, и те его разделы, контуры которых еще только проявляются. Наверняка возникнут и многие новые направления. В начавшемся веке техника освободится от ряда феноменологических представлений, в связи с чем получат существенно более глубокое, нежели теперь, физическое осмысление такие важнейшие явления, как удар, турбулентность, пластичность, текучесть, разрушение, рассеяние энергии за счет внутренних несовершенств материалов, нелинейные волны и многие другие.

Однако, как бы ни эволюционировали техника и технологии центральной фигурой процесса, останется образованный инженер. То есть человек, знающий и понимающий современную науку и осознающий, что наука – есть мощный инструмент, позволяющий создавать технические системы, «умеющие» беречь природу, эко-

номить энергию и ресурсы, создавать новые материалы с заранее заданными свойствами и, наконец, рассчитывать эти системы с возможно большей полнотой и полезностью.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

Пачурин Г.В.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Н. Новгород, Россия

OPTIMIZATION OF PLASTIC SURFACE TREATMENT TO IMPROVE RELIABILITY, OPERATING METAL

Pachurin G.V.

Nizhny Novgorod State Technical University, RE Alekseeva, N. Novgorod, Russia

Анализ литературных данных и результаты оригинальных исследований показывают [1-3], что различная пластическая деформация всего объема или только поверхности металла (ППД) не однозначно влияет на его циклическую долговечность в зависимости от амплитуды нагружения.

В настоящей работе представлены результаты сопоставления оптимальных режимов предварительной обработки, максимально повышающих долговечность материалов при амплитуде $\sigma_a \approx 0{,}5\ \sigma_B$ и сопротивление усталости на базе 10^5 циклов на воздухе и в коррозионной среде. Оказывается, что наиболее существенное улучшение сопротивления разрушению при циклическом нагружении материалов наблюдается после комбинированных методов ППД.

Так предел выносливости на базе 10^5 циклов сварных соединений из стали 12Х18Н10Т возрастает в 1,26 раза после режима обработки: термическая, пластическая растяжением на 5…16%, пластическая обдувкой дробью, и в 1,03 раза после только одного растяжения до 7-10%. Циклическая долговечность в коррозионной среде (3%-ный водный раствор морской соли) сварных соединений из стали 12Х18Н10Т в результате двухстороннего дробеструйного упрочнения сварного шва увеличивается в 1,33 раза, но после растяжения на 7-10% снижается на 22%.

Наиболее эффективными технологическими способами повышения циклической долговечности сварных соединений являются термическая обработка и поверхностное пластическое деформирование материала шва и околошовной зоны.

В процессе электродуговой сварки происходит изменение структуры стали, приводящее к появлению высоких остаточных растягивающих напряжений в области шва (100 МПа на глубине до 0,08 мм) и снижению сопротивления усталости. Сварной шов характеризуется тонкодисперсным строением (аустенит и δ-феррит). Ширина шва (встык) равна 3-5 мм. Результаты испытаний показывают, что двустороннее упрочнение сварного шва улучшает его сопротивление знакопеременным нагрузкам. Термообработка (нагрев до 975 °С, 5 мин, охлаждение на воздухе) сварных образцов снижает предел выносливости и циклическую долговечность, но при этом уменьшается разброс экспериментальных данных за счет выравнивания свойств по всему объему материала и снятия внутренних напряжений.

Операция «термоправки» заметно ухудшает сопротивление усталости сварных термообработанных образцов.

Термообработка (нормализация) сварного шва перед операцией поверхностного упрочнения пучком проволоки благоприятно сказывается на усталостных свойствах стали 12Х18Н10Т. Так, при уровне приложенного напряжения 420 МПа долговечность сварных образцов после термообработки и упрочнения пучком проволоки в 9,5 раза больше, чем у образцов, обработанных только пучком проволоки.

Эффективный и производительный метод упрочнения пучком проволоки позволяет обрабатывать неровные поверхности, что обусловливает его широкое распространение в производстве. Однако этот способ обработки в нашем случае дает более низкие результаты, чем пневмодробеструйная обработка, из-за тонкого сечения (2 мм) образцов, для которых нецелесообразна большая глубина наклепа.

Долговечность при $\sigma_a = 320$ МПа образцов после пневмодробеструйной обработки с