

УДК 539.3

**О НЕКОТОРЫХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМАХ МЕХАНИКИ,
ИМЕЮЩИХ НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ ¹**

ОБРАЗЦОВ И. Ф.

XXVI съезд КПСС поставил важные задачи по созданию надежных, долговечных и высокопроизводительных машин и аппаратов, транспортных средств, по решению топливно-энергетических проблем и по разработке принципиально новых технологических процессов.

Механика — одна из древнейших наук — является теоретической основой всей современной техники. Именно механике обязаны своим появлением и развитием кораблестроение, авиация, ракетно-космическая техника и т. п.; принципы механики положены в основу очень многих технологических процессов.

В свою очередь, с развитием современной техники и технологии связана постановка ряда новых задач и проблем в области механики.

Так, например, возникло новое направление механики материалов, связанное с необходимостью создания высокопрочных материалов и конструкций, работающих в различных, в том числе и экстремальных условиях (при крайне низких и высоких температурах, при радиационном облучении, при кратковременных интенсивных тепловых и ударных воздействиях и т. п.). Одним из таких перспективных направлений является механика композитов — материалов, обладающих направленным комплексом свойств, соответствующих назначению и условиям эксплуатации конструкции.

Недавно появившаяся область так называемой космической технологии также ставит новый комплекс проблем: механику жидкостей и газов в невесомости, строительную механику и механику управляемых движений систем твердых и деформируемых тел в условиях микрогравитации, механику разворачивающихся и стабилизирующихся в космическом пространстве конструкций.

Новые задачи аэрогидродинамики возникли в связи с практической необходимостью интенсификации технологических процессов по переработке нефти и газа, а также при выяснении новых механизмов увеличения нефтеотдачи нефтеносных пластов, повышения производительности трубопроводных систем нефти и газа.

В последнее десятилетие все больше и больше методы механики начинают проникать в биологию и в медицину, что привело к зарождению нового раздела механики — биомеханики. Благодаря развитию биомеханики стало возможным более глубокое понимание различных сторон работы сердечно-сосудистой системы, установление некоторых качественных и количественных закономерностей дыхания и кровообращения, механики опорно-двигательной системы человека и т. д. Такого рода результаты могут быть использованы при диагностировании и лечении ряда заболеваний,

¹ Доклад на V Всес. съезде по теорет. и прикл. механике. Алма-Ата, 1981 г.

как, например, при диагностике сердечно-сосудистых заболеваний и создании искусственного сердца, восстановлении двигательных функций организма и протезировании.

Выше приведены лишь отдельные хорошо известные фрагменты, показывающие, что появление и развитие целого ряда новых направлений техники и естествознания, как правило, было непосредственно связано с решением фундаментальных и прикладных проблем механики.

В настоящем сообщении обсуждаются некоторые проблемы механики, которые в первую очередь обусловлены созданием крупных современных объектов и сооружений, обладающих высокой надежностью и экономичностью, имеющих большое значение в народном хозяйстве, в частности современных объектов авиационной техники, трубопроводных систем, в том числе магистральных трубопроводов нефти и газа, атомных энергетических станций.

1. Исследование статической и динамической прочности сложных современных инженерных конструкций (самолетных конструкций) с использованием ЭВМ. Построение математических и физических моделей на основании натуральных экспериментов. Успехи в развитии вычислительной техники и программировании расширили возможности решения задач статической и динамической прочности больших размеров, сложных конструкций, каким является, например, современный самолет. Однако было бы наивным рассчитывать на то, что можно достигнуть удовлетворительного решения, полагаясь лишь на параметры высокопроизводительных ЭВМ.

Основу процессов исследования и проектирования конструкций составляют все-таки расчетные модели, от которых в значительной мере зависит достижение качеств, настойчиво предъявляемых практикой проектирования, таких, как повышение достоверности, информативности и оперативности исследований, наряду с относительным снижением их трудоемкости и стоимости. Таким образом, первая основная проблема при рассмотрении сложных конструкций заключается в создании эффективных математических моделей исследуемых систем, которые не только обеспечивают выполнение заданных требований к информативности и точности исследований, но и одновременно являются экономичными, способствуя, в частности, минимизации затрат машинного времени и памяти ЭВМ. В настоящее время проблема создания достоверных и экономичных математических моделей особенно стала актуальной в строительной механике по следующим причинам:

- увеличение сложности конструкций и условий их эксплуатации;
- существенно сжатые сроки проектирования и отработки конструкций, обусловленные ростом номенклатуры, а также увеличением сменяемости изделий вследствие сокращения сроков морального и физического старения;
- повышение требований к качеству и эффективности как самих изделий, так и процесса проектирования и научных исследований;
- причины, обусловленные также желанием более глубокого проникновения в суть явлений деформирования конструкций.

Серьезные надежды на решение проблемы эффективных моделей для сложных инженерных конструкций связываются с численными методами строительной механики, в частности с наиболее популярным в настоящее время их представителем — методом конечных элементов (МКЭ). Однако в своей традиционной трактовке он, вообще говоря, не обладает качествами экономичного и оперативного метода. Высокая размерность математической модели МКЭ, большие объемы перерабатываемой информации и, как следствие, весьма сильные требования к характеристикам ЭВМ создали известные трудности при попытках его использовать в качестве единого инструмента для решения комплекса задач, связанных с проектированием сложных конструкций. Здесь наибольшие успехи использования МКЭ в основном относятся к линейным задачам статики.

Динамические задачи, тем более в нелинейной постановке, требуют, во-первых, более производительных ЭВМ, во-вторых более экономичных моделей. Более перспективным при этом является видоизмененная форма МКЭ, так называемый метод суперэлементов и, в частности, его многоуровневой вариант, который позволяет исследовать движение отдельных составных частей сложных конструкций, а затем представить движение системы как линейную суперпозицию полученных движений «подконструкций». Это позволяет значительно снизить порядок уравнений движения и более эффективно использовать ЭВМ.

Построение эффективных моделей, особенно динамических моделей сложных конструкций, может быть выполнено с наибольшей достоверностью лишь с привлечением натуральных экспериментов. Например, такой расчетно-экспериментальный подход позволил, в частности, отработать математическую модель деформирования центральной части пассажирского самолета ЯК-42, включая область сочленения крыла и фюзеляжа (причем упрощенная модель сочленения фюзеляжа и крыла была обоснована натурным экспериментом).

На основе принятой математической модели, имеющей очень большую размерность, в весьма ограниченные сроки, предшествующие выпуску самолета на пассажирские перевозки, были выполнены расчетные исследования, позволившие вместе с экспериментом обосновать статическую прочность и дать заключение о ресурсе конструкции для начального периода эксплуатации.

Таким образом, при анализе сложных конструкций одной из центральных задач является построение на основе полученных экспериментальных данных математической модели объекта, т. е. идентификация рассматриваемого объекта.

Вообще говоря, идентификация включает в себя три этапа исследований: экспериментальное изучение поведения объекта; построение математической модели; проверка соответствия поведения объекта и модели.

Главный вопрос здесь — определение структуры и параметров математической модели объектов.

Идентификация особенно важна при изучении динамики сложных конструкций. В настоящее время идентификация линейных колебательных систем изучена достаточно хорошо.

Одним из наиболее удобных методов идентификации линейных систем является так называемый модельный способ, заключающийся в выделении резонансным способом, например гармоническим тестовым сигналом одной из основных форм колебаний. Этот способ может быть использован не только для дискретных, но и для систем с распределенными параметрами.

Как известно, большинство машин являются нелинейными системами. Идентификация нелинейных систем в отличие от линейных систем не является достаточно разработанной областью, особенно в прикладном плане. В настоящее время нет общих методов идентификации для достаточно широкого круга нелинейных систем, это направление по существу находится на начальной стадии своего развития. Мы умеем идентифицировать только лишь колебательные системы с одной степенью свободы для некоторых простейших типов нелинейностей, когда последние являются малыми. Определенные перспективы в этом отношении имеет модальный способ при соответствующей его модификации для многомерных систем с малыми нелинейностями. Но для практики важным является определение существенно нелинейных характеристик, например типа люфтов, сухого трения, релейных характеристик и т. д.

Таким образом, в настоящее время определение параметров нелинейных динамических систем применительно к сложным объектам представляет большой научный и практический интерес.

Нужно развивать не только количественные, но и качественные методы идентификации нелинейных систем. Это одно из актуальных направ-

лений в динамике сложных нелинейных объектов, имеющих прежде всего прикладную направленность.

Современные объекты техники, например самолетные конструкции, испытывают интенсивные динамические нагрузки, которые могут определять прочность и надежность их конструкций.

Только комплексный подход, основанный в сочетании численных экспериментов на ЭЦВМ и экспериментальных исследований натуральных объектов для определения параметров объекта, может позволить создание прочных и надежных конструкций.

2. Динамика тонкостенных натуральных конструкций, взаимодействующих с жидкостью и с газом применительно к современной технике. Как известно, тонкостенные оболочки являются одним из основных конструктивных элементов многих объектов современной техники. Теория линейных колебаний оболочек в настоящее время хорошо разработана и представлена в известных трудах как советских, так и зарубежных авторов.

Сравнительно меньшим числом работ представлены нелинейные колебания оболочек. В большинстве случаев теория нелинейных колебаний оболочек построена на допущении об идеальности характеристик (оболочка однородна, изотропна или ортотропна, идеальной геометрической формы и т. п.). Все реальные оболочки не обладают указанными свойствами, они имеют начальные отклонения от определенной геометрической формы, имеют присоединенные массы, подкрепляющие элементы, вырезы и т. п., т. е. динамически не симметричны.

В настоящее время имеются лишь отдельные работы, посвященные изучению нелинейных колебаний цилиндрических оболочек с начальными несовершенствами, из которых следует, что малая динамическая асимметрия обуславливает появление ряда специфических нелинейных эффектов (эффект «бегущих» волн, удвоение спектра частот и т. п.), которые создают дополнительную динамическую напряженность оболочечных конструкций, способную привести к разрушению конструкции.

В оболочке с малыми начальными несовершенствами, находящейся в сверхзвуковом потоке, наблюдалось явление типа флаттера, но со следующей спецификой: форма флаттера с ограниченной амплитудой колебаний типа стоячей волны переходит в форму бегущей волны в окружном направлении, причем в ламинарном пограничном слое колебания происходят с ограниченной амплитудой и разрушения оболочки не происходит. При полностью же развитом турбулентном пограничном слое наблюдается так называемый бурный флаттер, который продолжается до тех пор, пока оболочка не разрушится, при этом также наблюдаются бегущие в окружном направлении волны большой интенсивности.

Изучение такого рода нелинейных явлений очень важно для современных инженерных конструкций, в частности для объектов новой техники, так как они могут быть причиной разрушений конструкций. Исследование нелинейных колебаний оболочек с различными несовершенствами, которые всегда имеют место в реальных конструкциях, выполнено далеко не достаточно, в настоящее время имеется лишь небольшое количество работ, иллюстрирующих специфику и прикладную важность этого направления; отсутствует общая теория нелинейных колебаний оболочек с несовершенствами, взаимодействующих с жидкостью или с газом.

Поэтому в дальнейшем нужны систематические как теоретические, так и экспериментальные исследования нелинейных колебаний оболочечных систем с различными конструктивными особенностями и также взаимодействующих с жидкостью и с газом применительно к конкретным объектам новой техники, что позволит заранее в процессе проектирования предвидеть такие неожиданные опасные ситуации, которые могут привести к нарушению прочности и снижению надежности конструкций.

Изложенное выше позволяет заключить, что при оценке прочности сложных современных инженерных конструкций наряду с традиционным

анализом статистической и динамической прочности всей конструкции и отдельных ее частей с привлечением вычислительной техники и натуральных экспериментов необходимым элементом является также анализ нелинейных явлений, которые могут иметь место в реальных конструкциях и способны повлиять на прочность и надежность объектов.

3. Динамика и прочность конструкций трубопроводных систем в технике. Создание очень многих важных технических объектов и сооружений связано с исследованием статической и динамической прочности конструкций трубопроводных систем, в частности колебаний и устойчивости облочечных систем с протекающей в них жидкостью. К числу таких наиболее актуальных технических проблем относятся: обеспечение динамической устойчивости, прочности и безотказной работы гидросистем управления самолетом, топливной и масляной гидромагистралей газотурбинных двигателей; обеспечение динамической прочности в атомном энергетическом машиностроении; статическая и динамическая прочность магистральных трубопроводных систем нефти и газа.

При работе гидродинамических систем управления, топливной и масляной систем самолета и вертолета возникают неустановившиеся движения жидкости, которые сопровождаются колебаниями давления жидкости и расхода, гидравлическими ударами, приводящими к высоким ударным и вибрационным нагрузкам на элементы системы. Практика и исследования показывают, что в таких системах наблюдаются колебания достаточно большой амплитуды как упругой конструкции, так и значительные пульсации жидкости. В ряде случаев режимы работы в насосах меняются ступенчато как по давлению, так и по расходу.

Таким образом, возникает необходимость в исследовании волновых и вибрационных процессов в таких системах, в управлении ими и стабилизации в условиях сильно меняющихся нагрузок.

Эта проблема является актуальной не только в авиационной технике, но и в других объектах — в судостроении, в энергетических системах и др. В ряде случаев колебательные процессы должны изучаться с учетом кавитационных образований. Исследованию динамики трубопроводных систем посвящено много работ, благодаря которым получены важные в практическом плане результаты. Например, во многих случаях техническая задача об устранении колебаний трубопроводных систем решается введением в объект различных податливых элементов, уводящих систему от резонанса, или установкой гасителей колебаний. Однако в настоящее время эта проблема как в теоретическом, так и в практическом плане не имеет достаточно полного решения. Управление волновыми и вибрационными процессами в сложных трубопроводных системах, например коллекторных и др., является весьма актуальной, особенно в условиях сильно меняющихся внешних нагрузок.

Эта проблема должна решаться комплексно как путем проведения широкого круга экспериментальных исследований на специально созданных стендах с имитацией упругих характеристик магистралей и входящих элементов с различными типами насосов, так и теоретическим изучением колебательных процессов упругих систем с жидкостью, а также с учетом кавитационных образований, приводящих в ряде случаев к динамической неустойчивости или к кавитационной эрозии. При этом особенно важно изучить нелинейное динамическое взаимодействие между пульсациями в жидкости или газе и колебаниями упругих элементов в условиях меняющихся внешних нагрузок и вибраций. В таком плане эти задачи в настоящее время не получили достаточного развития, хотя результаты уже некоторых выполненных работ показывают перспективность такого рода постановок в динамике трубопроводных систем. Проблема динамики трубопроводных систем имеет свою специфику в различных отраслях техники, в связи с этим и уровень ее разработанности не одинаков. В настоящее время возник ряд проблем трубопроводных систем нефти и газа, имеющих

важное народнохозяйственное значение.

1. Разработка новых способов создания высокопроизводительных трубопроводов нефти и газа, обладающих наименьшей металлоемкостью. В решении этой проблемы можно наметить два основных направления.

Разработка различных вариантов труб для повышения статического давления при наименьшей металлоемкости. К этому направлению можно отнести также идею, которая в настоящее время предложена и разрабатывается Институтом электросварки им. Е. А. Патона АН УССР по созданию многослойных трубопроводов для транспортировки газа. В будущем представляется перспективным изготовление трубопроводов из композиционных материалов — метод непрерывной намотки позволяет получать трубы практически неограниченной длины, стойкие к коррозии и хрупкому разрушению.

Разработка способов уменьшения гидравлического сопротивления труб для увеличения их пропускной способности. В этом направлении практически надежных и экономичных способов, по-видимому, пока не установлено, хотя интересные результаты имеются, например эффект уменьшения гидравлического сопротивления за счет малых добавок высокомолекулярных соединений и другие механизмы уменьшения сопротивления движению жидкости.

2. Изучение лавинообразных механизмов разрушения в газовых трубопроводах и определение практических методов их устранения.

3. Разработка методов повышения динамической прочности трубопроводов нефти и газа при наименьшей металлоемкости.

Трубопроводы нефти и нефтепродуктов подвержены вынужденным колебаниям, обусловленным работой насосных агрегатов и также гидравлическим ударам за счет остановок насосных систем, которые, как показывает практика, могут происходить десятки раз в месяц и более.

Таким образом, возникает проблема исследования волновых и вибрационных процессов (колебаний конструкций, давления и расхода) в магистральных нефтяных трубопроводах и разработка эффективных мер защиты от вибраций. Эта задача, в отличие от аналогичных задач в авиационной технике, решена далеко недостаточно полно, и защита магистральных трубопроводов от повышенного давления выполняется сбросом перекачиваемого продукта в безнапорный резервуар, что не является полным и экономичным решением этой проблемы. Аналогичные задачи управления вибрационными процессами возникают также в газопроводах, следовательно, нужна комплексная разработка проблемы по управлению волновыми и вибрационными процессами в магистральных трубопроводах на основе как стендовых исследований, так и в условиях эксплуатации с одновременным решением теоретических задач по изучению колебаний упругих систем с жидкостью и с газом.

4. **О проблемах динамической прочности ядерных энергетических систем.** Интенсивное развитие в последние годы атомного энергетического машиностроения ставит перед механикой ряд новых прикладных проблем в области динамики и прочности конструкций, взаимодействующих с потоками жидкости, газа и двухфазной среды — пароводяной смеси.

Опубликованные работы позволяют заключить, что, как показывает опыт эксплуатации зарубежных ядерных реакторов, в большинстве случаев поломки и аварии на атомных электростанциях (АЭС) происходят по причине чрезмерных вибраций внутрикорпусных устройств, находящихся в потоке теплоносителя, в частности трубчатых элементов реактора и теплообменников. Как известно, особо повышенные требования к надежности и безопасности АЭС в течение нескольких десятков лет и более при наметившейся тенденции к повышению энергоемкости и к снижению металлоемкости конструкций АЭС позволяют проблему вибраций считать одной из главных при оценке прочности и надежности АЭС.

В настоящее время имеется богатый материал в этой области, который позволяет заключить, что проводимые исследования большей частью носят экспериментальный характер и в основном посвящены решению задач по определению динамических воздействий на трубки теплообменников и реакторов с учетом технологических и конструктивных особенностей. Имеются также расчетные методики для определения амплитуд колебаний и анализа динамической устойчивости гидроупругих систем, развито физическое моделирование вибрационных процессов в элементах реактора.

Анализ опубликованных работ позволяет наметить некоторые пути дальнейших исследований:

— развитие систематических исследований по построению более полных математических моделей, описывающих колебания трубных пучков с учетом различных источников возбуждения колебаний. Здесь важным является учет гидродинамического взаимовлияния отдельных труб трубных пучков (в отдельных работах показано, что гидродинамическое взаимодействие оказывает существенное влияние на динамическое поведение системы труб);

— проведение теоретических и экспериментальных исследований нелинейных, в том числе автоколебательных, движений трубных пучков для количественного определения их динамических характеристик, в частности получение амплитудно-частотных характеристик, построение устойчивых предельных циклов автоколебаний и т. д. Имеющиеся результаты количественного определения характеристик колебаний в основном не подтверждаются экспериментами;

— разработка методов идентификации трубных пучков (как линейных, так и нелинейных колебательных систем). Построение таких моделей позволит выполнить оптимальное проектирование внутренних элементов реактора;

— развитие экспериментальных исследований по управлению волновыми и вибрационными характеристиками всей гидродинамической системы АЭС в целом на специальных гидродинамических стендах; разработка методов управления колебательными процессами. Действительно, не всегда является правильным изучение динамического поведения части системы, в данном случае трубных пучков. Может оказаться целесообразным и более рациональным исследование всей системы в совокупности, имея в виду при этом управление динамическими процессами с помощью специальных устройств, управляющих колебаниями как потока, так и упругими колебаниями системы. Исследования в этом направлении, особенно учитывающие нелинейный характер колебаний жидкости и гибких упругих элементов, проводятся явно в недостаточном объеме.

Таким образом, выполнение всесторонних систематических исследований вибраций АЭС позволит получить рекомендации по повышению надежности, безопасности и экономичности АЭС, по режимам эксплуатации атомного оборудования, по оптимальному проектированию таких систем и по новым конструктивным решениям с улучшенными технико-экономическими показателями.

Москва

Поступила в редакцию
8.IV.1982