

Тарасов Ю.Л., Хазанов Х.С., Ахмедьянов И.С., Леонов В.И., Мехеда В.А.,
Перов С.Н., Савельев Л.М., Скворцов Ю.В., Хивинцев А.В.

**ПРОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ РАКЕТНО-
КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ И ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ
(ИЗ ОПЫТА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ КАФЕДРЫ
ПРОЧНОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ)**

Наука о прочности летательных аппаратов решает, как известно, следующие задачи:

- разработка методов определения нагрузок, действующих на летательный аппарат (ЛА), установление наиболее тяжелых режимов нагружения, разработка и обоснование требований к прочности и жесткости конструкции;
- разработка методов расчета напряженно-деформированного состояния элементов конструкций при действии статических и динамических нагрузок, разработка методов определения разрушающих нагрузок и предельного состояния отдельных элементов и конструкции аппарата в целом;
- разработка методов экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния с целью определения реальной прочности и жесткости;
- разработка методов теоретического и экспериментального определения надежности и ресурса отдельных агрегатов, узлов и всего изделия;
- совершенствование и развитие аналитических и численных методов расчета конструкций.

Некоторые из этих задач к настоящему времени решены, но многие из них ждут своего решения и доведения до этапа практического использования. Более того, число этих задач не уменьшается, а все время возрастает. Особенно это касается вопросов надежности, ресурса и т.д.

Эти задачи решаются силами ученых и специалистов, работающих в научно-исследовательских институтах, в опытно-конструкторских бюро, а также коллективами кафедр различных высших учебных заведений страны.

Определенный вклад в решение этих задач вносила и вносят кафедра прочности летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева.

Научно-исследовательская работа на кафедре на протяжении ряда лет ведется в двух направлениях. Эти направления можно определить следующим образом:

- разработка математических моделей и методов расчета тонкостенных конструкций летательных аппаратов с учетом нерегулярности локальных нагрузок, неоднородности материала и нелинейности;

- исследование прочности и надежности элементов конструкций летательных аппаратов при экстремальных условиях эксплуатации.

Научные исследования на кафедре выполнялись для предприятий Самары, Нижнего Новгорода, Ульяновска, Коломны на хоздоговорной основе, а также за счет второй половины дня преподавателя.

Кафедра работала с ЦНТК им. П.Д. Кузнецова. Это были работы, связанные с повышением ресурса авиационных двигателей. Затем главным заказчиком на многие годы стало ЦСКБ, которое ставило задачи по обоснованию нагрузок на конструкции ракетно-космической техники, исследования влияния условий эксплуатации космических летательных аппаратов на физико-механические свойства материалов, на работоспособность элементов электро-, радиосистем, пар трения и т.д. Кафедра также выполняла для ЦСКБ работы, связанные с обеспечением прочности и надежности разработываемых перспективных конструкций.

В последние годы установились стабильные хоздоговорные отношения с ОАО "Титровостокнефть".

Ниже дается обзор некоторых наиболее важных работ, выполненных сотрудниками кафедры за последние 10-15 лет.

Значительным вкладом в развитие общих принципов метода конечных элементов в перемещениях, его связи с вариационными принципами механики была книга Образцова И.Ф., Савельева Л.М., Хазанова Х.С. "Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов", выпущенная издательством "Высшая школа" в 1985 году [1].

В книге рассмотрены принципиальные вопросы сходимости конечно-элементных решений, способы построения матриц жесткости и матриц масс пилотажных конечных элементов, схемы конечно-элементной идеализации конструкций летательных аппаратов, их расчет на прочность и колебания; представлены примеры расчетов.

Эта книга, имеющая гриф "Учебное пособие", публикуется авторами ряда публикаций энциклопедического плана.

В работах доцента Савельева Л.М. и его соавторов разработана эффективная процедура неявного интегрирования системы уравнений движения в методе конечных элементов с учетом больших деформаций, физической нелинейности и нелинейности граничных условий. Точность процедуры соответствует точности метода Ньюмарка

считающегося наилучшим из существующих методов неявного интегрирования уравнений движения, но значительно превосходит его по экономичности. Последнее связано с необходимостью выполнения дополнительных итераций на каждом шаге по времени во всех используемых в настоящее время неявных методах, что отсутствует в предлагаемой процедуре. С помощью этого подхода в диссертации Калугина Н.А. решена задача об осевом ударе спускаемого аппарата о грунт. Основные результаты диссертации изложены в отчетах по НИР и в статье [3].

Савельевым Л.М. разработана программа решения обобщенной алгебраической проблемы собственных значений при расчете колебаний и устойчивости методом конечных элементов, совместно со Сворцовым Ю.В. разработан конечный элемент произвольной оболочки. Элемент имеет шесть степеней свободы в каждом узле, что обеспечивает естественное объединение его с другими конечными элементами при расчете конструкций. Элемент обладает характеристиками точности и сходимости, соответствующими лучшим из существующих конечных элементов произвольной оболочки.

Совместно с Борисовой О.В. выполнено исследование устойчивости панелей подкрепленной цилиндрической оболочки при сжатии и при сдвиге. На основании обширных числовых экспериментов, выполненных с использованием пакета PATRAN/NASTRAN, существенно уточнены применяемые в настоящее время расчетные формулы. Результаты этих исследований готовятся к публикации.

Совместно с А.Г. Аистовым и др. опубликована статья [4], обобщающая результаты внедрения программы Auto PIPE в ОАО "Гипростокнефть". Совместно с Леоновым В.И. и Сворцовым Ю.В. написана инструкция по работе с Auto PIPE в трех частях.

Профессором Хазановым Х.С. и доцентом Леоновым В.И. была разработана методика расчета цилиндрических оболочек с вырезом и жесткими включениями при локальных нагружениях, основанная на комбинации аналитического решения дифференциального уравнения пологой цилиндрической оболочки с методом конечных элементов. Результаты этих работ были опубликованы и доложены на ряде конференций [5-7]. По заказу ЦСКБ Леоновым В.И. и инженером Кановой Г.В. была разработана специализированная программа расчета подкрепленных оболочек вращения. Для ОАО "Гипростокнефть" Леоновым В.И., Савельевым Л.М. и доцентом Сворцовым Ю.В. была проведена работа по адаптации программы Auto PIPE к практике проектных работ.

В работах Сворцова Ю.В. совместно с Хазановым Х.С. решены следующие задачи:

– разработан в тензорном изложении универсальный подход к построению геометрически нелинейных конечных элементов, обеспечивающий разделение вкладов различных деформаций;

– построены новые конечные элементы бруса, однородной и многослойной оболочек и на базе последних – составные элементы трехслойной оболочки с многослойными композитными обшивками и легким ортотропным заполнителем;

– разработаны методика учета физически нелинейного поведения слоистого композиционного материала с учетом его разрушения и методы моделирования расщеплений и анализа их роста;

– разработана методика исследования устойчивости и несущей способности трехслойных конструкций при больших перемещениях с использованием моделей разной сложности.

Основные результаты настоящих исследований изложены в работах [8-10].

Одним из научных направлений Скворцова Ю.В. и доцента Хивинцева А.В. была разработка и программная МКЭ-реализация методики оценки прочности и герметичности болтовых фланцевых соединений различных оболочек и трубопроводов, работающих под давлением, учитывающей весь комплекс важнейших особенностей работы реальных узлов в процессе монтажа и эксплуатации. При этом фланцы моделировались сеткой конечных элементов изгибаемых пластин, а оболочки цельными отсеками, матрицы жесткости которых строились по известным аналитическим решениям моментной теории оболочек.

В ходе широкомасштабных численных экспериментов было исследовано влияние на герметичность стыков учета в расчетной модели таких факторов, как дискретность расположения и податливость болтов, упругоэластическое поведение прокладки, изменение в ходе нагружения реальной площади контакта прокладки и фланцев, предварительное обжатие прокладки с последующей ее разгрузкой и повторной затяжкой болтов эксплуатационным усилием и др. [11].

Сравнение расчетов по двум конечно-элементным моделям позволило выявить особенности, учет которых не оказывает существенного влияния на расчетную герметичность стыка, а именно, изгибную жесткость болтов и упругоэластическое поведение фланцев и оболочек, а также трение на поверхности контакта.

В дальнейшем уже с использованием МКЭ-системы высокого уровня MSC/NASTRAN были проведены численные эксперименты на расчетной модели, использующей трехмерные и оболочечные конечные элементы и позволившей учесть дополнительно упруго-пластическое поведение фланцев и оболочек, изгибную жесткость

болтов, наличие трения на поверхности контакта прокладки и фланцев, а также реальную схему нагружения конструкции.

Благодаря единоличной многолетней научно-исследовательской деятельности доцента Ахмедьянова И.С. на кафедре прочности летательных аппаратов разработан численный метод квадратур для расчета тонких гладких оболочек вращения на действие произвольной нагрузки. Суть метода квадратур состоит в том, что исходная система дифференциальных уравнений задачи сначала преобразуется в интегральную. Затем ко всем появляющимся при этом интегралам с переменными верхними пределами применяется квадратурная формула трапеций (или формула Симпсона), что позволяет составить систему линейных алгебраических уравнений для определения значений искомых функций с заданным постоянным весьма малым шагом. В результате таким способом удастся получить численные значения всех частных решений рассматриваемой системы дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, а затем формально построить и ее общее решение, содержащее произвольные постоянные. Последние определяются обычным образом из граничных условий по краям заданной оболочки вращения.

С помощью метода квадратур выполнены расчеты различных оболочек вращения:

- сферические, эллиптические, оживальные и торообразные оболочки, нагруженные произвольным образом;
- эллиптические днища, нагруженные через упругое кольцо сосредоточенными воздействиями (в том числе циклическими нагрузками);
- эллиптические днища, имеющие кольцевое подкрепление переменной толщины вокруг центрального отверстия;
- сочленение сферического днища с цилиндрическим патрубком через торообразный переход.

Помимо расчетов оболочек вращения метод квадратур удастся применять также к расчету круглых пластин переменной толщины, к расчету устойчивости прямолинейных сжатых стержней переменного сечения и к расчету частот и форм совместных изгибно-крутильных колебаний нестреловидного крыла переменной жесткости.

Результаты всех выполненных расчетов по методу квадратур опубликованы в работах Ахмедьянова И.С. [12-15].

Следует подчеркнуть значимость аналитических решений, полученных Ахмедьяновым И.С. применительно к расчету тонкостенных элементов конструкций в виде пластин и оболочек. Несмотря на хорошо развитые и обоснованные численные методы

расчета на прочность, не отпадает надобность в исследовании их точности и сходимости. И в решении этих вопросов важную роль играют аналитические методы расчета.

Неупругость в металлах проявляется в виде петли механического гистерезиса. При малых уровнях напряжений, соизмеримых с пределом усталости и ниже его, отклонения от закона Гука весьма малы. В работе доцента Мехеды В.А. использовался метод выделения неупругой составляющей деформации ε_n как в пределах измерительного моста [26], так и в результате вычитания оцифрованных сигналов полной деформации ε и напряжения σ в исследуемой точке

$$\varepsilon_n = \varepsilon - \sigma/E.$$

где E – нормальный модуль упругости материала.

Для упрощения сбора и обработки информации спроектирована, изготовлена, испытана цифровая измерительная система на основе прецизионного 24 битного А-Ц аналого-цифрового преобразователя [26]. Проведены исследования нелинейных деформаций в образцах из стали 1Х18Н9Т при статических режимах нагружения. Неточность измерения нелинейных деформаций составила $1 \cdot 10^{-7}$. Нелинейные деформации появляются в поверхностном слое образца при напряжении 45 МПа (предел выносливости образцов из стали 1Х18Н9Т равен 240 МПа).

Как показали результаты исследований, для получения сопоставимых данных необходимо строгое соблюдение режима нагружения как по уровню напряжений, так по времени.

Экспериментально обнаружен факт скачкообразного развития пластических деформаций при увеличении скорости нагружения.

В 1992 году издательством "Машиностроение" выпущена монография "Надежность элементов конструкций летательных аппаратов" авторов Тарасова Ю.Л., Минранского Э.И., Дуплякина В.М. [2]. В монографии, написанной на основе проведенных на кафедре экспериментальных и теоретических исследований, дана оценка влияния условий эксплуатации и конструктивно-технологических факторов на свойства конструкционных материалов на основе комплексных исследований с использованием теории многофакторного эксперимента. Предложены методы определения вероятности безотказной работы силовых элементов конструкций ЛА как без трещиноподобных дефектов, так и при наличии таких дефектов производственного и эксплуатационного характера. Рассмотрены два вида отказов: внезапный (потеря несущей способности) и постепенный (усталостное разрушение). Изложенные методы проиллюстрированы примерами расчета.

Для проведения экспериментальных исследований на кафедре было создано необходимое оборудование: вибростенды, вакуумные камеры. Оборудование, созданное под руководством профессора Тарасова Ю.Л., позволяло проводить усталостные и статические испытания, а также проводить испытания, связанные с оценкой влияния таких эксплуатационных факторов, как вакуум, нагрев, охлаждение, а также некоторых технологических и конструкционных факторов на физико-механические свойства элементов конструкций ЛА. Было создано также уникальное портативное оборудование, позволяющее проводить испытания на борту космического летательного аппарата (КЛА) в открытом космосе [24]. На основе исследований разработана методика обеспечения надежности элементов конструкций (КЛА) с учетом эксплуатационных и конструктивно-технологических факторов на этапе их проектирования [25].

На основе этих исследований были опубликованы статьи, монографии, защищены докторские и кандидатские диссертации.

Методология обеспечения надежности на этапе проектирования, разработанная применительно к конструкциям (КЛА), позволила преподавателям кафедры успешно решать подобные задачи, касающиеся надежности трубопроводных систем.

Накопленный в настоящее время опыт эксплуатации магистральных трубопроводов показывает, что большая часть наблюдаемых повреждений происходит без видимых причин: внутреннее давление перекачиваемого продукта не превышает расчетного, отсутствуют пластические макродеформации в очаге разрушения, а механические свойства материала трубы изменяются в незначительных пределах. Из-за недостаточной информации о действующих нагрузках и весьма приближенного представления о значениях механических характеристик материала конструкции, определяющих его сопротивление действующим нагрузкам, основным методом оценки прочностной надежности до настоящего времени является назначение запасов прочности. Значения этих запасов принимаются в зависимости от стабильности условий нагружения, справочных данных о механических характеристиках, уровня технологии и ряда других факторов. Допустимые значения запасов прочности назначают с учетом инженерного опыта создания подобных конструкций. До настоящего времени отсутствует теоретическое и экспериментальное обоснование составляющих запаса прочности, не учитывается стохастическая природа действующих нагрузок и характеристик используемых конструкционных материалов, что приводит к существенному увеличению металлоемкости трубопроводов и назначению неоправданно высоких значений коэффициентов запаса. Так, например, в соответствии со СНиП 2.05.06-85 суммарный коэффициент запаса из усло-

вий работы трубопровода, надежности по материалу, по нагрузке и т.п. составляет около 5.

В связи с этим задача оценки работоспособности линейных частей существующих магистральных трубопроводов и обеспечения надежности трубопроводных систем на стадии их проектирования в настоящее время приобрела огромную актуальность. При этом проблема обеспечения надежности должна решаться с учетом влияния совокупности конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, с одной стороны, а также с учетом стохастического характера эксплуатационных нагрузок и рассеивания характеристик вязкости и прочности элементов конструкции, с другой стороны. Решению именно этой проблемы посвящены научные работы, доклады на конференциях и научно-технические отчеты коллектива сотрудников и аспирантов кафедры прочности летательных аппаратов [16-23].

Результаты проводимых кафедрой научных исследований широко используются преподавателями в лекционных курсах, в курсовом и дипломном проектировании, а также при организации студенческой научно-исследовательской работы.

Научно-методический опыт кафедры позволил преподавателям в короткое время освоить сложные фундаментальные науки и обеспечить их преподавание для такой специальности университетского плана, как "Динамика и прочность машин".

Библиографический список

1. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задаче строительной механики летательных аппаратов. – М.: Высш. шк., 1985.
2. Тарасов Ю.Л., Миноранский Э.И., Дуплякин В.М. Надежность элементов конструкций летательных аппаратов: Методология обеспечения. – М.: Машиностроение 1992.
3. Савельев Л.М., Дымарский Д.Г., Калугин Н.А. Эффективная схема прямого численного интегрирования нелинейных конечно-элементных уравнений движения деформируемого тела. // Известия вузов, Авиационная техника. – 1993, №1. с. 6-9.
4. Аистов А.Г., Леонов В.И., Савельев Л.М., Сергеева Т.Н., Скворцов Ю.В., Секинд Э.С. Опыт работы с программой Auto PIPE в ОАО "Тирповостокнефть". Все САПР. Информ.-технич. дайджест", вып. 4 – 2001. – с. 15-19.
5. Леонов В.И. Расчет цилиндрической оболочки, нагруженной локально через крутой жесткий кронштейн и подкрепленной кольцевой накладкой // Межвузовский сб. "Вопросы прочности и долговечности авиационных конструкций". – Куйбышев КуАИ. 1990. – с. 24-31.

6. Леонов В.И. К расчету локального нагружения оболочек вращения // Тезисы докладов IV Всесоюзной научно-технической конференции. Харьков, 1991.
7. Хазанов Х.С., Леонов В.И., Машуков А.А. Матрица жесткости цилиндрической оболочки с круглым вырезом при симметричном относительно образующей и кососимметричном в перпендикулярном направлении напряженно-деформируемом состоянии. – Деп. в ВИНТИ № 3757 – В97 от 24.12.1997.
8. Скворцов Ю.В., Хазанов Х.С. Нелинейный анализ произвольных оболочечных конструкций с использованием криволинейного изопараметрического элемента // Изв. вузов. Авиационная техника.- 1989.-№2.- с.15-19.
9. Скворцов Ю.В., Хазанов Х.С. Влияние расслоений на несущую способность трехслойных пластин. // Изв. вузов. Авиационная техника.- 1990.-№4.- с.21-24.
10. Скворцов Ю.В., Хазанов Х.С. Расчет многослойных композитных оболочек в геометрически нелинейной конечно-элементной постановке. // Изв. вузов. Авиационная техника.- 1992.- №1- с.6-10.
11. Скворцов Ю.В., Хивинцев А.В. Оценка герметичности болтовых фланцевых соединений оболочек с учетом предварительного обжатия прокладки. – Деп. в ВИНТИ 25.12.98, №3881-В98.
12. Ахмедьянов И.С. Применение метода квадратур к интегрированию разрешающей системы дифференциальных уравнений изгиба оболочек вращения // Известия АН СССР, Механика твердого тела. – 1990. №4.
13. Ахмедьянов И.С. Расчет оболочек вращения переменной толщины при осесимметричном и антисимметричном нагружении. – Деп. в ВИНТИ: 17.12.99, №3265-В99.
14. Ахмедьянов И.С. Расчет безмоментных оболочек вращения по методу квадратур // Вестник Самарского государственного университета. – 2005, №2 (36).
15. Ахмедьянов И.С. Применение безмоментной теории и теории красового эффекта к расчету длинных оболочек вращения методом квадратур. – Деп. в ВИНТИ: 16.06.06, №803-В2006.
16. Логвинов С.Л., Перов С.Н., Тарасов Ю.Л. Проблема оценки надежности трубопроводных систем при их проектировании // Сб. трудов международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин". – М.: Машиностроение, том 2, 2003. – с. 244-248.
17. Логвинов С.Л., Перов С.Н., Тарасов Ю.Л. Методика оценки вероятности безотказной работы трубопроводных систем // Вестник Самарского гос. аэрокосм. университета им. акад. С.П. Королёва, №1 (3), 2003. – с. 111-119.

18. Логвинов С.Л., Перов С.Н., Тарасов Ю.Л. Статистический анализ надежности магистрального трубопровода в зоне сейсмического разлома // Труды II Всероссийской научно-практической конференции "Надежность и экологическая безопасность трубопроводного транспорта", 17-19 мая 2005 г., Самара. – с. 99 - 104.
19. Перов С.Н., Тарасов Ю.Л. Конструктивно-технологические средства обеспечения надежности и ресурса трубопроводных систем // Труды II Всероссийской научно-практической конференции "Надежность и экологическая безопасность трубопроводного транспорта", 17-19 мая 2005 г., Самара. – с. 148-161
20. Аграфенин С.И., Перов С.Н. Использование статистических подходов для обоснования проектных решений перехода подземного трубопровода через сейсмический разлом // 4-я Российская конференция "Методы и программное обеспечение расчетов на прочность". – Геленджик, Краснодарский край. 2-7 октября 2006г. с. 12-13.
21. Перов С.Н., Скворцов Ю.В., Цапурин К.А. Вычисление коэффициентов интенсивности напряжений для труб с поверхностными трещинами // Наука и технология. Том 1. / Труды XXVI Российской школы. - М.: РАН. 2006. - с. 274 - 281.
22. Перов С.Н., Скворцов Ю.В., Цапурин К.А. Решение задачи статистической динамики для магистрального трубопровода // Вестник Самарского гос. аэрокосм. университета им. акад. С.П. Королева, №1 (9) в 2006. – с. 187-194.
23. Тарасов Ю.Л. Методология обеспечения надежности конструкций летательных аппаратов с учетом эксплуатационных и технологических факторов // ИВУЗ "Авиационная техника. – 1993. №2. – с. 4-10.
24. Махутов Н.А., Тарасов Ю.Л., Дуплякин В.М. Испытания материалов в космосе / Заводская лаборатория. – 1994, т. 67. №1. – с. 83-92.
25. Тарасов Ю.Л. Применение критериев сопротивления разрушению при оценке надежности элементов конструкций космических аппаратов на этапе проектирования // Сб. трудов Рос. Н-т. конференции "Мавлютовские чтения". т.3. Механика процессов деформирования вязкоупругопластических тел. – Уфа: УИ АТУ. 2006.
26. Мехеда В.А. О связи между нелинейными деформациями и усталостной прочностью некоторых авиационных материалов при неоднородном поле напряжений / Сборник трудов. – Куйбышев: КуАИ. 1973.