

ниями $\sigma_k = \text{const}$ ($k=1, 2$). Локальные значения погонных усилий определяются с погрешностью порядка $1/n$. Уравнения нулевого приближения совпадают с уравнениями для расчета стержневой системы, жесткостные характеристики которой назначены специальным образом, обеспечивающим (с указанной погрешностью) эквивалентность этой системы заданной оболочке.

СОВЕЩАНИЕ ПО ПРОБЛЕМАМ ПРОЧНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ

Комиссия по прочности двигателей при Научном совете АН СССР по проблемам прочности и пластичности провела в Ленинграде с 29 марта по 1 апреля 1977 г. Научно-техническое совещание по проблемам прочности двигателей. В его работе приняли участие около 500 ученых и специалистов, представляющих научные учреждения, вузы и промышленные предприятия Москвы, Ленинграда, Киева, Куйбышева, Харькова, Казани и Омска.

Во вступительном слове председатель Комиссии по прочности двигателей член-корреспондент АН СССР Э. И. Григोलук отметил, что очередное совещание по прочности двигателей проводится в знаменательный год — шестидесятилетия нашего государства. Он кратко сформулировал цели и задачи совещания и перечислил важнейшие проблемы, стоящие перед специалистами по прочности двигателей. К ним относится проблема исследования двигателя как конструкции в целом, при этом отметили необходимость:

- установления реальной напряженности элементов конструкции двигателя в период эксплуатации;
- накопление статистических данных о силовых, тепловых и иных воздействиях на наиболее ответственные элементы двигателей;
- изучение поврежденных элементов конструкций с целью выявления реальных причин, определяющих разрушения.

По-прежнему остается наиболее важной проблема выбора и создания новых материалов для элементов конструкций. Поэтому исследование механического поведения материалов входит в задачу совещания и подлежат разработке следующие вопросы: создание моделей разрушения материала при статических, малоцикловых и вибрационных нагрузках при нормальных и высоких температурах; формулировка критериев прочности и несущей способности для материалов различного вида применительно к действительным условиям работы материала; разработка теории усталостной прочности при сложном напряженном состоянии материалов; разработка теории пластичности и ползучести при неизотермическом циклическом нагружении; создание методов ускоренных испытаний материала.

На совещании было заслушано 45 докладов по многим актуальным вопросам современного двигателестроения.

В докладе «Проблемы термоциклической прочности деталей ГТД» Н. Д. Кузнецов (Куйбышев) отметил, что вопросы термоциклической прочности наряду с усталостью являются одними из наиболее актуальных в проблеме обеспечения надежности ГТД. Проблема эта усугубляется в связи с тенденциями развития газотурбинных двигателей в направлении повышения температуры и давления газа.

Указал на возможность рассмотрения циклических воздействий тепловых и механических нагрузок двумя путями: либо на основе упругопластического расчета с учетом диаграммы многократного циклического деформирования, либо путем исследования методами теорем приспособляемости, основанными на вариационных теоремах Мелана и Кайтера. Однако расчеты, основанные на теории приспособляемости, не учитывают ползучести и снижения прочности во времени, поэтому они правомерны для кратковременных режимов.

Обратил внимание на важность экспериментальной отработки термоциклической прочности, так как нагрузки, вызванные неравномерным нагревом, при проектировании могут быть учтены со значительно меньшей точностью, чем механические, и они уточняются в процессе доводки.

С. М. Шляхтенко (Москва) посвятил свой доклад перспективам развития двигателей гражданской авиации.

В докладе «Механика деформированного твердого тела и прочность элементов конструкций» И. А. Биргера (Москва) указал, что цель расчета на прочность современного двигателя состоит в получении оценок надежности конструкции путем построения детерминированной или статистической модели надежности, которая содержит четыре подмодели: формы, нагрузок, материала, разрушения.

Отметил возросший интерес в последнее время к проблеме разрушения, которая стала новым, важным разделом механики твердого тела. Разрабатываются проб-

лемы микроразрушения (теории трещин), причем основные усилия направлены на учет пластической деформации в вершине трещины.

В связи с успехом линейной механики разрушения обратил внимание на появление новых методов оценки свойств материала.

Л. Е. Ольштейн (Москва) в докладе «Современное состояние и актуальные проблемы аэроупругости турбомашин» отметил, что увеличение общей напряженности рабочего процесса современных турбокомпрессорных установок приводит к повышению вибронпряженности их лопаток и проявлению новых механизмов возбуждения колебаний. Надежное прогнозирование вибронпряженности новых конструкций, оперативное снижение уровня вибраций в процессе доводки возможно только на основе более глубокого изучения взаимодействия аэродинамических и механических факторов колебаний лопаток.

Указал на развитие в нестационарной аэродинамике лопаток турбомашин экспериментальных методов, которые позволяют проверить основные теоретические результаты. Дальнейшее развитие получили исследования кардинальной проблемы аэроупругости турбомашин — флаттера лопаток. Особенно хорошо изучен связанный низкочастотный флаттер лопаток первых ступеней осевых компрессоров по основному тону колебаний.

Обратил внимание на сложность и актуальность проблемы флаттера узких бандажированных лопаток.

В докладе Г. И. Генкина, И. В. Егорова, В. Т. Ефремовой, Л. А. Зимина, Н. Н. Ступиной (Москва) «Расчетно-экспериментальное исследование колебаний диска турбины с бандажированными лопатками» приводится алгоритм решения задачи о колебаниях бандажированного колеса турбины с учетом податливости диска. Показано удовлетворительное согласование расчетных значений собственных частот колебаний системы с результатами тензометрирования, проведенного на испытательной установке. Получены частотные характеристики бандажированного колеса на различных режимах работы турбины.

А. Т. Василенко, Я. М. Григоренко, Г. П. Голуб, Н. Д. Панкратова (Киев) в докладе «О расчете напряженного состояния элементов конструкций на основе классической и уточненной теорий оболочек» рассмотрели вопросы, связанные с определением напряженно-деформированного состояния оболочечных элементов конструкций на основе классической и уточненной теорий оболочек с переменными параметрами, и провели расчеты напряжений и перемещений в цапфе ротора осевого компрессора и в лопатке газовой турбины.

Доклад Э. Н. Дарчинова (Казань) был посвящен расчету приведенной долговечности деталей при эксплуатации двигателей по состоянию. Получены расчетные формулы приведенной статической долговечности рабочих лопаток и циклической долговечности дисков турбины ГТД.

В докладе Н. П. Знаменского, Н. И. Котерова (Москва) «Определение жесткостей элементов конструкции роторов и корпусов ГТД» приводятся методы расчета на жесткость элементов роторов и корпусов, схематизируемых в виде конических и цилиндрических оболочек постоянной и переменной толщины. Проведено сравнение результатов, полученных при использовании различных методов.

Н. Н. Малинин и А. А. Нигин (Москва) в докладе «Исследование длительной прочности елочных замков» изложили метод расчета на длительную прочность елочных замков лопаток турбин при циклическом нагружении с учетом неравномерного распределения усилий по зубьям и концентрации напряжений в галтелях. На примере плоского надрезанного образца результаты расчета сопоставляются с экспериментальными данными.

Доклад Г. С. Писаренко, Е. И. Халавка, А. П. Яковлева (Киев) «Исследование влияния металлических покрытий на демпфирование колебаний тонкостенных элементов конструкций» был посвящен результатам исследования влияния покрытий из никеля, меди и др. на демпфирование изгибных колебаний тонкостенных элементов из титановых сплавов, наносимых высокотемпературным распылением материалов, включая плазменное и детонационно-газовое.

В докладе Н. В. Моисеенкова, Н. П. Семенихина (Москва) «Оценка взаимозаменяемости материалов авиадвигателей» на основе анализа диаграмм предельных амплитуд напряжений сталей и сплавов производится оценка взаимозаменяемости конструкционных материалов. Показано, что применение технологических методов: повышения усталостной прочности позволяет решать вопрос замены материалов с различными усталостными характеристиками.

Л. Д. Магомаев (Ленинград) в докладе «Приложение некоторых методов к расчету колебаний турбинных лопаток» предложил способы расчета параметров собственных колебаний турбинных лопаток в процессе решения соответствующей задачи Штурма — Лиувилля: численный, основанный на применении преобразованных формул Рунге — Кутты, и аналитический, основанный на разложении искомого решения в степенной ряд. Точность и эффективность расчетов проверены экспериментально и путем сравнения с некоторыми замкнутыми решениями.

Доклад М. Л. Кемпнера, О. Н. Соболевой (Москва) «Исследование колебаний оболочечных элементов корпусов и роторов газотурбинных двигателей» был посвящен рассмотрению колебания корпусов газотурбинных двигателей, представляющих собой регулярные оребренные цилиндрические оболочки, и колебаниям роторов барабано-дисковой конструкции. Расчет проводится с использованием теории регулярных и квазирегулярных систем.

В докладе Л. Н. Базиной, Б. С. Блишника, В. Т. Ефремовой, Б. Ф. Шорра (Москва) «Оптимальная статическая разгрузка закрученных лопаток турбомашин» разработан метод расчета оптимальной по условиям статической прочности разгрузки от газовых сил закрученных лопаток турбомашин с учетом неравномерного распределения напряжений по поперечному сечению и многорежимной работы. Приведены примеры расчета.

И. И. Поспелов, С. М. Наумов (Москва) в докладе «Экспериментальное и теоретическое исследование неустановившейся ползучести элементов двигателя» приводят решение задачи о неустановившейся ползучести шарнирно опертой и защемленной круглой пластины, нагруженной равномерно распределенной поперечной нагрузкой. Дают описание испытательной установки, методики и результатов экспериментального исследования ползучести круглых пластин.

В докладе Ю. К. Пономарева, И. Д. Эскина (Куйбышев) «Многослойные демпферы авиационных ГТД» были приведены результаты теоретического и экспериментального исследования кольцевых многослойных гофрированных демпферов, применяющихся для гашения колебаний роторов ГТД, и дан метод расчета их упругодемпфирующих свойств.

Ю. Д. Денисов, Р. Г. Перельман (Москва) в докладе «Динамическая прочность и разрушение лопаток турбомашин при локальных нагружениях» изложили особенности механики нагружения и разрушения материалов при их ударных взаимодействиях с жидкими частицами. Процесс разрушения материала описали функцией распределения долговечности элементов поверхностного слоя с учетом разрушений в последующих слоях.

Доклад В. А. Бермана, М. Я. Коднера (Москва) «Исследование влияния отклонений размеров профиля на прочность полых сопловых лопаток турбомашин» был посвящен анализу изменения напряженного состояния сопловой лопатки турбомашин при производственных отклонениях размеров профиля на базе одномерной стержневой теории. Показана зависимость напряжений от величины производственных отклонений при действии изгибающих моментов от газодинамических сил, перепада давления на стенку профиля и неравномерного распределения температуры по сечению лопатки.

В докладе И. А. Биргера, А. Б. Дмитриева, П. Д. Левашова, Ю. В. Шехтмана (Москва) «Метод конечных и структурных элементов и расчет прочности элементов двигателей» рассмотрены проблемы использования метода конечных и структурных элементов при расчете деталей двигателей с учетом упругости, пластичности и ползучести материала. Уделено внимание технике реализации метода на ЭВМ, в частности, вопросам автоматического разбиения исследуемых областей на конечные элементы с использованием датчиков случайных чисел.

А. Ф. Гуров, В. А. Комков, В. Д. Токарев (Москва) в докладе «Исследование долговечности элементов конструкций двигателей при изменяющемся напряжении и температуре в условиях ползучести» предложили уравнение, описывающее накопление повреждаемости в элементах конструкций при изменяющемся напряжении и температуре.

Доклад В. В. Шашкина, Н. А. Шерлыгина, Б. В. Ямщикова (Ленинград) «Исследование влияния условий эксплуатации на долговечность рабочих лопаток турбин ГТД» был посвящен теоретическим и экспериментальным исследованиям влияния на долговечность лопаток турбины температуры и давления наружного воздуха, профиля полета, часового расхода топлива, скорости полета. Авторами разработана методика, позволяющая установить дифференцированный ресурс авиационных двигателей в зависимости от длительности полета, а также прогнозировать долговечность двигателей на стадии проектирования.

В докладе В. В. Пискуна, В. Г. Савченко, Ю. Н. Шевченко (Киев) «Напряженное состояние составных роторов с учетом напряжений натяга» определены контактные напряжения при горячей посадке диска произвольного профиля на вал конечной длины и найдено упругопластическое напряженное состояние в диске составного ротора при его вращении. Исследование проводилось на основе численного метода решения осесимметричной пространственной задачи термопластичности.

В. М. Капралов, В. А. Малей, А. П. Сыроежкин (Ленинград) в докладе «Исследование динамической напряженности деталей ГТД с помощью магнитной записи и машинной дешифровки материалов» представили способ регистрации материалов динамического тензометрирования на магнитную ленту и автоматической машинной расшифровки.

Доклад Б. Н. Брусникина, И. Н. Молчанова (Киев) «О проекте диска турбомашин минимального веса» был посвящен рассмотрению задачи о проектировании диска минимального веса с учетом силового и теплового воздействия в пластической области работы материала. Силовое и температурное поля определялись из совместной системы: уравнения напряженного состояния и стационарного уравнения теплопроводности. Пластические деформации учитывались методом переменных параметров упругости. В качестве ограничений выбраны ограничения по интенсивности напряжений и разрушающему числу оборотов.

В. К. Борисов, В. А. Пухлий (Москва) в докладе «Задача термоупругости для рабочих дисков радиальных турбомашин» рассмотрели применение модифицированного метода последовательных приближений к расчету термоупругих напряжений в рабочих дисках радиальных турбомашин произвольного профиля при стационарном нагреве.

В докладе Л. А. Заслоцкой, А. К. Русановского, В. Т. Троценко, Л. Ф. Шестопала (Киев) «Исследование критериев усталостного разрушения жаропрочных сплавов при комплексном воздействии механических и термических напряжений» приведены результаты исследования усталостной прочности жаропрочных сплавов при круговом изгибе в условиях изотермического и неізотермического нагрева.

П. П. Гонтаровский, Г. А. Марченко, А. Н. Подгорный, В. Н. Торлин (Харьков) посвятили свой доклад «Возможности метода конечных элементов в контактных задачах» описанию приближенного подхода к решению плоских и осесимметричных контактных задач в различных постановках, в основе которых используется метод конечных элементов.

В докладе А. Л. Абасова, А. С. Вольмира, В. Ф. Михнева, А. Т. Пономарева (Москва) «Исследование аэроупругих свойств лопаток кольцевых решеток при нестационарном обтекании» предлагаются пути сочленения аэродинамической и упругой частей задачи, основанные на использовании метода интегральных представлений с разложением движения системы по собственным формам колебаний, найденным с помощью метода конечных элементов. Для упругой части задачи применяются различные схемы, основанные на гипотезах Кирхгофа — Лява и Тимошенко. Указывается на особенность аэродинамической части задачи, состоящей в том, что картина обтекания каждой лопатки описывается с учетом аэродинамического взаимодействия ее с остальными; упругое взаимодействие между лопатками не учитывается.

В. И. Венедиктов, И. В. Демьянушко, Е. Ш. Еремкебаева, Е. Ф. Королева, Ю. М. Темис (Москва) в докладе «Оценка прочности, долговечности и оптимальное проектирование дисков турбомашин» рассмотрели опыт расчетно-экспериментальных исследований прочности и долговечности, а также оптимизации конструкции дисков ГТД. Отметили, что разработанные методы расчета кинетики напряжений и деформаций в дисках, основанные на теориях неізотермической пластичности и ползучести, позволяют реализовать алгоритмы расчета дисков ГТД, работающих в условиях циклического нагружения и повышенных температур. Указали, что оптимальное проектирование, основанное на методах математического программирования и упругопластического расчета, позволяет с помощью ЭВМ получать проекты дисков минимального веса, достаточной прочности и надежности, рассчитанные на заданные условия работы.

В докладе А. М. Журавлевой, Б. С. Лукина (Харьков) «Применение метода конечных элементов для исследований колебаний элементов газотурбинных двигателей» на основе метода конечных элементов разработаны алгоритмы и составлены Алгол-программы расчета собственных колебаний различных элементов конструкций ГТД. Алгоритмы позволяют реализовать метод конечных элементов на ЭВМ типа М-222. Приведены результаты численных исследований.

И. Ю. Колесников, В. Е. Попович (Москва) в докладе «Об одном методе расчета температурных полей и напряжений в дисках переменной толщины» предложили расчет температурных полей и напряжений во вращающихся дисках переменной толщины, в котором разрешающие дифференциальные уравнения теплопроводности и теории упругости с переменными коэффициентами проинтегрированы модифицированным методом последовательных приближений. Показана сходимость полученного решения. Составлена программа для расчета температурных полей, напряжений и перемещений с учетом зависимости физико-механических характеристик материала от температуры.

Задачи прогнозирования характеристик ползучести и длительной прочности сплавов для ГТД с учетом дисперсии рассматривались в докладе И. Н. Богомоловой, И. П. Булыгина, Е. Р. Голубовского, Р. Н. Сизовой, И. И. Трушина (Москва); в докладе В. П. Иванова, А. С. Сердотецкого, Е. Д. Хурина (Москва, Куйбышев) рассматривались работы на исследованию колебаний венцов с неидентичными лопатками и разброс резонансных напряжений; вопросам оптимизации закрученных стержней по спектру собственных частот посвятил свой доклад В. Б. Гринев (Харьков).

Ряд докладов был посвящен исследованиям колебаний лопаточного аппарата турбомашин (Ю. С. Воробьев, М. Л. Корсунский, Н. Г. Медведев), рассмотрению проблем организации на ЭВМ комплексных расчетов ГТД на прочность (В. И. Купцов, Н. А. Курильская, М. М. Стратонова, Г. У. Толмач, Москва), экспериментальным исследованиям закономерностей ползучести и длительной прочности натуральных дисков высокотемпературных ГТУ (И. И. Остапчук, А. Ф. Пронкин, Харьков, Москва), задачам выбора критерия усталостной прочности дисковых материалов для двухосного растяжения (И. Н. Шканов, Казань), рассмотрению метода расчета нестационарных колебаний сложных амортизированных систем (Г. В. Мищенко, Ю. П. Самсонов, Москва) и изучению изгибных колебаний многовальных систем ГТД при учете различных скоростей вращения роторов (В. О. Бауер, Москва), оценке эквивалентности методов вибрационных исследований транспортных двигателей (А. М. Баженов, К. С. Пулькис, Е. В. Рогова — Москва, Омск), вопросам прочности сварных титановых дисков ТРД (Н. П. Андреева, М. Я. Коднер, А. М. Потемкина, М. И. Тяпкова — Москва), анализу результатов исследования вынужденных колебаний дисков турбин в условиях неравномерного потока газов (А. Н. Ведин, А. А. Ковалев, А. А. Мухин, В. Г. Скуридин, В. А. Стрункин — Казань), изучению напряженного состояния и оптимизации параметров диска диагональной ступени турбомашин (Л. Г. Горынин, Е. М. Гребелюк — Омск).

В решении, принятом на совещании, отмечено повышение уровня научных исследований в области прочности двигателей. Указано на целесообразность дальнейшего, еще более интенсивного исследования статической и динамической прочности основных элементов двигателей с учетом реального поведения материала и действительных условий работы элементов с использованием при этом вычислительной техники и эффективных методов анализа.

Совещание считает важным разработку уточненных моделей расчета элементов, разработку оптимальных расчетов в рамках этих моделей.

Проблема выбора материала, проблема создания новых материалов, исследование их механических свойств по-прежнему остаются первостепенными проблемами в двигателестроении. Следует усилить внимание к более широкому, более всестороннему экспериментальному изучению поведения материала до его разрушения при реальных условиях его нагружения, а также на создание моделей механического поведения и разрушения материала при разнообразных условиях его деформирования, в том числе и на разработку критериев прочности материалов.

Совещание вновь подчеркнуло необходимость постановки работ по контролю напряженного и деформированного состояния ответственных элементов двигателя в эксплуатационных условиях.

Следующее совещание по прочности двигателей намечено провести в Ленинграде в 1979 г.

Е. И. Болдырев

Технический редактор *Т. В. Ванькова*

Сдано в набор 6/VI-1977 г. Т-13175 Подписано к печати 5/VIII-1977 г. Тираж 1725 экз.
Зак. 2464 Формат бумаги 70×108¹/₁₆ Усл. печ. л. 18.2 Бум. л. 6¹/₂ Уч.-изд. л. 20,9

2-я типография издательства «Наука». Москва, Шубинский пер., 10