

## ОТЗЫВ

официального оппонента **В.Ю. Волоховского**  
на диссертационную работу **М.В. Зарецкого**  
«Численное моделирование напряженно-деформированного состояния  
конструкций авиационных изделий при совместной эксплуатации с  
носителем», представленной к защите на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Сложные технические объекты, в том числе конструкции авиационной техники, должны эффективно выполнять требуемые функции. Для этого они должны быть правильно спроектированы, рассчитаны и изготовлены с учетом всех возможных эксплуатационных ситуаций. Взаимодействие с окружающей средой, проявляющееся в виде действия на конструкции внешних нагрузок, происходит, как правило, в условиях неопределенности. Широко распространенные нормативные метода расчета, использующие понятие расчетных нагрузок, т.е. достаточно высоких, редко встречающихся детерминированных значений внешних нагрузок, не лишены известных недостатков. Во-первых, сколь бы высокими не были значения расчетных нагрузок, добиться абсолютной надежности конструкций не удастся. Во-вторых, расчет на так называемые гарантированные значения нагрузок приводит к чрезмерному расходу материалов, большим коэффициентам запаса, что экономически невыгодно, а порой и технически неосуществимо. Особенно это касается объектов авиационной и ракетно-космической техники. Поэтому разработка математических моделей, алгоритмов и методов расчета динамических реакций конструкций авиационной техники на случайные внешние воздействия и оценка их долговечности на основе вероятностных подходов и методов теории надежности является актуальной проблемой. Решению одной из важных задач в этой проблеме посвящена представленная к защите диссертационная работа.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 102 страницы набранного на компьютере текста, включая 63 рисунка и 5 таблиц.

**Во введении** приводится обоснование актуальности и значимости выбранной темы диссертации, дается краткий анализ современного состояния проблемы оценки параметров долговечности и безопасности эксплуатации авиационных изделий, транспортируемых совместно с самолетом-носителем, а также сформулирована **цель диссертации:**

*«разработка методики, комплекса расчетных моделей и проведение параметрических исследований динамического деформирования, прочности и долговечности конструкций авиационных изделий при случайном вибрационном нагружении, которое соответствует этапу совместного полета с носителем».* Для достижения поставленной цели диссертантом намечено решение следующей группы задач:

- разработка конечно-элементной модели узла конструкции и получение на ее основе распределения вероятностных характеристик параметров напряженно-деформированного (НДС) состояния;
- сопоставление расчетных вероятностных характеристик динамического состояния узла конструкции с данными лабораторно-стендовых испытаний;
- анализ НДС узла конструкции с учетом зон нерегулярностей напряжений;
- численное моделирование реализаций случайных процессов напряжений и формирование распределений амплитуд приведенных регулярных циклов напряжений;
- определение характеристик долговечности узла конструкции для различных условий случайного нагружения на основе скорректированной линейной теории накопления усталостных повреждений.

В заключительной части введения отмечается **научная новизна и практическая значимость** полученных результатов.

**В первой главе** проводится обзор отечественных и зарубежных литературных источников, связанных с решением поставленных в диссертационной работе задач. Проанализированы работы по методам оценки динамических реакций и НДС конструкций при случайных воздействиях, а также по оценке характеристик усталостного разрушения материалов и конструкций, вызванного случайными нагрузками. На основе проведенного обзора литературных источников, делается вывод о современном состоянии исследований в данных областях и обосновывается необходимость дальнейшего развития и совершенствования методов и средств достижения поставленной цели диссертационного исследования.

**Во второй главе** приводится краткое описание подходов, положенных в основу методики моделирования напряженно-деформированного состояния и оценки долговечности конструкций авиационных изделий при случайном нагружении.

При изложении методики моделирования приводится перечисление типов конечных элементов (КЭ), используемых для построения конечно-элементной модели (КЭМ) конструкции. Дается краткая характеристика свойств КЭ и особенностей их применения использования для построения КЭМ анализируемой конструкции. В разработанной методике демпфирование в конструкции учитывается с использованием обобщенной модели Рэйли, описывающей действие внешних и внутренних

диссипативных сил, пропорциональных соответственно массе и жесткости конструкции.

Предлагаемая методика оценки долговечности конструкции при случайном нагружении предусматривает применение численного моделирования реализаций случайных процессов напряжений. В соответствии с разработанной методикой расчет динамических реакции КЭМ конструкции проводится с использованием алгоритмов модального анализа и спектрального метода для случайных процессов. При этом внешнее воздействие задается как кинематическое возбуждение в форме стационарного гауссовского случайного процесса с заданной спектральной плотностью. Выборочные реализации случайного процесса напряжений, соответствующие определяемым спектральным плотностям напряжений, моделируются в виде гармонического ряда со случайной амплитудой и фазой.

Схематизация реализаций случайных процессов напряжений и построение кривых повторяемости циклов напряжений в предлагаемой методике проводится по методу «дождя». Результатом схематизации являются однопараметрические таблицы распределения амплитуд симметричных циклов.

Для расчетной оценки долговечности в предлагаемой методике используется скорректированная гипотеза линейного суммирования повреждений, в которой предельное значение меры усталостного повреждения отлично от единицы, а определяется экспериментальным или расчетным путем.

**В третьей главе** приводятся результаты расчетного анализа для изделия, располагающегося на внутренней подвеске самолета-носителя. Конструкция изделия состоит из оболочки-обечайки с тремя подкрепляющими элементами, двух узлов подвески (бугелей), габаритно-массового макета передних отсеков и заполнителя, размещенного в задней конструкции.

Для реального изделия разработаны две, соответствующие разным уровням идеализации конструкции, КЭМ: основная, которая формируется из оболочечных (SHELL) и объемных (SOLID) КЭ, а также упрощенная балочная модель на основе КЭ типа BEAM. С использованием обеих КЭМ выполнен анализ собственных частот и форм колебаний конструкции. Проводится сопоставление результатов расчетов пяти низших частот и форм колебаний, отмечается их удовлетворительное соответствие.

Расчетный анализ динамического состояния изделия выполнялся для случаев, когда его вынужденные колебания обусловлены кинематическим возбуждением в узлах подвески на носителе, которое задавалось в форме стационарного гауссовского случайного процесса ускорения со спектральной плотностью, заданной в диапазоне частот [0 – 360] Гц. Рассматривались два вида спектральной плотности ускорения: модельная (усеченный «белый шум») и спектральная плотность, соответствующая реальным условиям

эксплуатации изделия совместно с носителем («эксплуатационная вибрация»). Динамический расчет конструкции с использованием сформированных КЭМ выполнялся с применением модального анализа. При расчете на основе оболочечной КЭМ учитывалось десять собственных форм колебаний, высшая из которых имеет частоту 418,5 Гц. По результатам расчетов получены распределения среднеквадратических отклонений (СКО) и спектральные плотности виброускорений в узлах КЭМ, соответствующих определенным местам конструкции изделия. Показано, что имеет место удовлетворительное соответствие между уровнями и зонами максимальных виброускорений по результатам расчетов с использованием оболочечной и балочной КЭМ.

Верификация методики численного моделирования производилась путем сопоставления результатов расчета и полунатурных экспериментальных исследований. При этом использовались условия лабораторно-стендовых испытаний изделия, в которых кинематическое возбуждение создавалось путем задания широкополосного случайного процесса ускорения на бугелях изделия последовательно в двух направлениях. Режим нагружения реализовывался путем формирования спектральной плотности ускорения в диапазоне частот [5 – 300] Гц. Сопоставление результатов расчетов и данных экспериментов проводилось по интегральной характеристике – СКО ускорения в точках измерения. Представленные в работе данные свидетельствуют о том, что результаты численного моделирования по уровням виброускорений в целом удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным.

**Четвертая глава** посвящена анализу напряженного состояния конструкции авиационного изделия при случайных колебаниях. В ней реализована, представленная во второй главе диссертации, методика моделирования НДС реального объекта при действии стационарного случайного кинематического возбуждения в виде стационарного гауссовского случайного процесса ускорения с заданной спектральной плотностью.

Расчетный анализ эквивалентных напряжений в точках конструкции проводился на базе оболочечной КЭМ объекта. В результате расчетов определены значения величин СКО эквивалентных напряжений в опасных точках конструкции при воздействии на нее кинематического возбуждения типа «белый шум» и «эксплуатационная вибрация». Получены зависимости значений спектральной плотности и дисперсии напряжений от частоты в зоне наибольшей изменчивости напряжений, которая наблюдается вблизи переднего бугеля. Отмечено, что по характеру зависимости спектральной плотности от частоты процесс эквивалентных напряжений является узкополосным как в случае кинематического возбуждения типа усеченный «белый шум», так и при «эксплуатационной вибрации».

**В пятой главе** содержится приложение разработанной методики оценки долговечности конструкции конкретного авиационного изделия при случайном нагружении. Оценка характеристик долговечности проводится по полученной при КЭ анализе конструкции модели НДС и скорректированной гипотезе линейного суммирования усталостных повреждений.

Исходными данными для реализации скорректированной гипотезы линейного накопления повреждений служат характеристики приведенной кривой усталости, а также максимальные уровни циклов напряжений и их количество, которые определяются по графикам функции повторяемости напряжений.

Генерирование реализаций случайных процессов напряжений выполнено методом статистического моделирования на основе их спектральных характеристик, полученных при решении соответствующей задачи статистической динамики. Схематизация смоделированных реализаций процессов напряжений проведена по методу «дождя» и по результатам вычислений построены графики функций удельной повторяемости регулярных циклов напряжений. Для элемента конструкции, находящегося в зоне наибольших уровней напряжений, определены параметры кривой усталости (материал конструкции – сталь 30ХГСА) и проведено ее построение.

Расчетным путем определены значения корректирующего коэффициента в гипотезе накопления повреждений и получены соответствующие оценки долговечности. В случае возбуждения конструкции усеченным «белым шумом» корректирующий коэффициент принимает значение:  $a_p=0,29$ . При воздействии «эксплуатационной вибрации» так же  $a_p=0,29$ . Рассчитано, что в случае кинематического возбуждения конструкции модельным усеченным «белым шумом» ресурс изделия составляет 61,3 часа, а в режиме «эксплуатационной вибрации» – 40 часов.

**Заключительный раздел** диссертации содержит сводку основных результатов и рекомендаций.

**Список литературы** содержит 78 наименований источников, непосредственно относящихся к теме диссертации.

Диссертационную работу соискателя отличает достаточная научная обоснованность и аргументированность исходных положений, ясное изложение методик и алгоритмов, аналитических и численных методов исследования. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Она подтверждается корректным использованием апробированных механико-математических моделей, использованием высокоточных численных методов, сравнением с результатами экспериментальных исследований. Разработанные и реализованные расчетные методики и их численные алгоритмы, а также полученные результаты, отличаются элементами новизны и оригинальности. Результаты

предприятиях авиационной и ракетно-космической отрасли при проектировании объектов различного назначения.

Наряду с несомненными достоинствами диссертационной работы следует сделать несколько критических замечаний и пожеланий:

1) Конструкция авиационного изделия, транспортируемого самолетом-носителем, в тексте диссертации описана весьма поверхностно. Расчетная схема конструкции изделия приведена лишь в автореферате (стр.15, рис.2). При этом в автореферате диссертации указано, что «расчетные исследования проводятся для авиационного изделия, находящегося на *внутренней* подвеске маневренного самолета», а в самой работе – на *внешней* подвеске (глава 3, стр. 49).

2) Не приводится формульное описание математической модели, используемой для расчетного анализа динамических реакций конструкции на внешние воздействия. Не указаны ограничения по типу эксплуатационных нагрузок.

3) Не ясно с какой целью произведен расчет частот и форм собственных колебаний на основе балочной КЭМ (глава 3), так как исследование напряженного состояния (глава 4) и оценка долговечности конструкции авиационного изделия при случайном нагружении (глава 5) выполнено с использованием его оболочечной КЭМ.

4) Не оговорено соответствие между номерами узлов балочной и оболочечной КЭМ изделия, что затрудняет анализ численных результатов, представленных в работе.

5) В изложении методики КЭ моделирования динамического состояния изделия (раздел 2.1) отмечено, что демпфирующие свойства конструкции изделия учитываются с использованием обобщенной модели Рэйли. Однако при представлении полученных численных результатов величины коэффициентов демпфирования (внешнего и внутреннего), использованные для расчетов, не приводятся.

6) При представлении результатов расчетов оценок спектральных плотностей реализациям случайных процессов (ускорений в узлах КЭМ, глава 3; эквивалентных напряжений в точках конструкции (глава 5), что само по себе является непростой задачей, не указано какие вычислительные алгоритмы были использованы.

7) Имеется ряд замечаний редакционного характера, а также по оформлению текста диссертации:

- не всегда верно проставлены знаки пунктуации;
- имеются погрешности редакционного и стилистического характера;
- имеют место описки и погрешности в нумерации рисунков (глава 2 и глава 5), в записи формул (например, в 2.3, 2.13, 2.20 и др.), а некоторые обозначения в них не пояснены (например, в 2.11) или не совпадают с соответствующими обозначениями в тексте.

Отмеченные замечания не снижают общего положительного впечатления о диссертации. Автором проделана большая, полезная и довольно трудоемкая в вычислительном отношении работа. Оценивая эту работу в целом, следует отметить, что она является законченным научным исследованием, выполненным по актуальной тематике на достаточно высоком научном уровне, отвечает современному уровню развития техники, обладает новизной, достоверностью и практической значимостью полученных результатов, содержит решение ряда новых задач. Исходные положения достаточно полно обоснованы, основные результаты опубликованы и доложены на конференциях и семинарах. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации, достаточно верно и полно отражает ее содержание.

Исходя из изложенного, можно сделать вывод о том, что представленная к защите диссертационная работа «Численное моделирование напряженно-деформированного состояния конструкций авиационных изделий при совместной эксплуатации с носителем» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Зарецкий Максим Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Официальный оппонент

Кандидат технических наук, доцент  В.Ю. Волоховский  
«29» октября 2014 г.

*Подпись кандидата технических наук В.Ю. Волоховского, доцента кафедры Динамики и прочности машин им. В.В. Болотина Национального Исследовательского Университета «МЭИ» заверяю:*

Начальник управления кадров НИУ МЭИ

 Баранова Е.Ю.

29.10.2014

