

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Шатова Александра Владимировича
«Моделирование деформативности композитных сетчатых
цилиндрических корпусов космических аппаратов»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.02.04 – Механика
деформируемого твёрдого тела

Диссертационная работа А.В. Шатова посвящена развитию теории моделей деформируемых тел со сложной многоуровневой структурой - сетчатых оболочек из полимерных композиционных материалов с учётом наличия в них сосредоточенных масс. Работа направлена на разработку методов постановки и решения краевых задач, допускающих аналитическое решение, для прогноза поведения сетчатых композитных оболочек.

Актуальность темы диссертации обусловлена следующим.

Объект исследования – сетчатые композитные оболочки – является относительно новым классом конструкций, обладающим высокой массовой эффективностью и находящим расширяющееся применение в конструкциях, прежде всего, ракетно-космической техники. Между тем, остаётся недостаточно исследованным поведение конструкций, включающих, наряду с силовой сетчатой структурой, присоединённых масс – полезной нагрузки, которая составляет подавляющую часть в массе готового изделия. Уместно отметить, что существующие методы расчёта сетчатых оболочек, используемые при проектировании и особенно при диагностике, основаны на математических моделях, требующих использования численных методов решения краевых задач, в то время как оперативность оценки параметров напряжённо-деформированного состояния во многих случаях лучше обеспечивается аналитическим решением, а усложнение уравнений для более точного описания деформирования рассматриваемых объектов делает их непригодными для получения конечных расчётных формул.

Поэтому остаются актуальными задачи совершенствования математических моделей стационарных и нестационарных процессов деформирования сетчатых композитных оболочек и конструкций, включающих такие оболочки в качестве несущих элементов, в том числе – постановка краевых задач, адекватно отражающих реальное деформирование и в то же время допускающих аналитическое решение.

Содержание работы. Диссертация объемом 147 страниц состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованных источников из 58 наименований, содержит 66 рисунков и 19 таблиц.

Глава 1 содержит описание объекта исследования и краткую характеристику основных видов математических моделей, используемых для описания поведения сетчатых композитных конструкций. Отмечается, что на начальных стадиях проектирования традиционно используются континуальные модели сетчатых оболочек, но детальный анализ требует

дискретного моделирования, которое, таким образом, является естественным инструментом для верификации континуального описания.

В главе 2 описана разработанная модель деформирования цилиндрической сетчатой оболочки с учётом полезной нагрузки, масса которой превышает массу несущей конструкции. Оболочка рассматривается как консольный цилиндр с жестким тяжёлым диском в незакреплённом поперечном сечении. Это позволило использовать для определения средних мембранных усилий уравнения безмоментной теории, а для перемещений – кинематические соотношения, дополненные аппроксимацией распределения граничных усилий (на линии контакта оболочки с диском) косинусоидальной функцией окружной координаты. Полученное аналитическое решение сопоставляется с результатами конечно-элементного анализа сетчатой оболочки как пространственной рамы, причём отмечается удовлетворительное совпадение результатов расчёта перемещений. Тем самым устанавливается, что существует диапазон конструктивных параметров, в котором уравнения безмоментной теории оболочек адекватно описывают деформирование консольно закреплённой сетчатой конструкции.

Глава 3 посвящена постановке и решению задаче об осесимметричном деформировании сетчатой оболочки при действии сжимающей силы. Существенно используется конструктивная ортотропия сетчатой оболочки. При постановке краевой задачи в уравнении равновесия моментной теории учтён нелинейный член – произведение погонной силы вдоль образующей на кривизну деформированного меридиана. Граничные условия не выписаны явно при формулировке задачи, а вводятся дополнительно при получении аналитического решения. Эти условия соответствуют жесткому защемлению одной кромки, в то время как на противоположной кромке отсутствуют прогибы и углы поворота нормали при разрешённом осевом перемещении.

Как и в главе 2, точность решения, аналитически полученного на континуальной модели, проверяется сопоставлением с результатами дискретного моделирования. Обнаруживается удовлетворительное согласие результатов (в пределах 1%).

Приведенные в конце главы результаты сопоставления с данными эксперимента показывают различие в продольной деформации порядка 6%, что с учётом специфики объекта моделирования представляется достаточно хорошим совпадением.

В главе 4 решается задача о деформировании горизонтального сетчатого цилиндра, закреплённого на двух опорах в крайних сечениях, с грузом на середине пролёта. Груз моделируется как жесткий тяжёлый диск пренебрежимо малой толщины. Поскольку использование моментной теории, по-видимому, не приводит к решению в замкнутом виде, использована полубезмоментная теория оболочек в варианте, предложенном В.В. Васильевым, и дополнительное предположение об отсутствии деформаций поперечных сечений. Аналитическое решение получено для двух вариантов кинематических граничных условий: при шарнирном

закреплении обеих кромок и при разрешённом осевом перемещении одной из кромок (что приводит к отсутствию интегральной растягивающей силы). Получены в аналитическом виде формулы для определения прогиба груза в зависимости от поперечной перегрузки и их обращение – зависимости перегрузки от измеренного прогиба, что позволяет оценивать фактическую перегрузку по данным измерения перемещений. Сопоставление результатов с данными дискретного моделирования показывает различие в 4,2%, что подтверждает адекватность описания сетчатой структуры континуальной моделью со сделанными упрощениями.

Глава 5 содержит решение задачи о свободных колебаниях консольно закреплённой сетчатой оболочки с жестким тяжёлым диском на свободной кромке. Используются уравнения полубезмоментной теории, модифицированные В.В. Васильевым, и дополнительное предположение об отсутствии деформаций поперечных сечений. Получено характеристическое уравнение относительно частоты свободных колебаний. Для случая, когда масса сетчатой структуры пренебрежимо мала по сравнению с массой груза, аналитически вычислен корень этого уравнения, соответствующий частоте основного тона. Выполнен параметрический анализ зависимости собственной частоты от угла наклона спиральных рёбер. Верификация полученных результатов сопоставлением с данными дискретного моделирования показала различие найденных значений собственной частоты в пределах 4%.

В главе 6 изучаются свободные колебания цилиндрической сетчатой оболочки, закреплённой на двух основаниях. Математическая модель построена на использовании базиса для форм свободных колебаний в виде произведений тригонометрических функций окружной координаты на «балочные» полиномиальные функции осевой координаты. Это позволило проекционным методом получить систему разрешающих уравнений, а затем записать характеристическое уравнение как условие вырожденности этой системы. Коэффициенты характеристического уравнения выражены через структурные параметры сетчатой конструкции. Получена аналитическая формула, позволяющая выразить частоту через целочисленный параметр (номер гармоники по окружной координате), а частота основного тона определяется как минимальная из частот, соответствующих ряду гармоник. Выполнен анализ влияния структурных параметров сетчатой конструкции на частоту основного тона. Установлено, что частота не зависит от числа спиральных рёбер. Предложено оценивать осевую жесткость сетчатой оболочки (эффективный модуль упругости) по данным экспериментального измерения частоты колебаний основного тона, что имеет практическое значение при диагностике конструкций. Верификация результатов с использованием дискретного моделирования подтверждает обоснованность сделанных выводов.

В заключении описаны основные результаты работы и сформулированы выводы.

Оценка научной новизны, достоверности результатов и практической значимости результатов.

Наиболее существенным результатом диссертации является получение аналитических решений задач о деформировании сетчатых оболочек регулярной структуры, содержащих сосредоточенные грузы, что позволило получить эффективную аналитическую оценку жесткости и собственных частот при известных структурных параметрах сетчатых конструкций.

Следующие результаты работы обладают **научной новизной**:

1) по-видимому, впервые получено обоснование адекватности континуального описания деформирования сетчатых оболочек из композиционных материалов на основе систематического сопоставления аналитических решений с данными полного дискретного моделирования;

2) для практически используемых сетчатых конструкций найдены упрощённые постановки краевых задач, допускающие получение аналитических решений и в то же время достаточно точно отражающие механическое поведение сетчатой структуры;

3) получены формулы для определения продольных и поперечных перемещений сетчатого отсека с учетом сосредоточенной массы полезного груза при действии перегрузок на этапе выведения и при транспортировке;

4) получены формулы для определения частоты первого тона свободных колебаний сетчатого отсека;

5) на основе полученных аналитических решений проведен анализ влияния параметров сетчатой структуры на жесткость и частоту свободных колебаний и найдены значения параметров, обеспечивающие наибольшую жесткость конструкции.

Эти результаты являются **значимыми** для прогноза поведения деформируемых сетчатых структур из полимерных композиционных материалов при механических воздействиях.

Практическая ценность диссертации состоит в возможности использования разработанных математических моделей, постановок краевых задач и полученных аналитических решений при рациональном проектировании сетчатых конструкций из полимерных композитов, интерпретации данных экспериментального измерения деформаций и резонансных частот, диагностике и неразрушающем контроле изделий.

Степень обоснованности выводов и рекомендаций. Достоверность результатов диссертации обеспечивается корректным применением апробированных методов и постановок задач различных вариантов теории оболочек, апробированных методов осреднения жесткостных параметров дискретных структур, и подтверждается согласованием аналитических результатов как с данными расчёта по другим моделям, так и с результатами физического эксперимента.

Диссертация по области исследования соответствует паспорту специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела: п. 2 «Теория моделей деформируемых тел с простой и сложной структурой», п. 4 «Механика композиционных и интеллектуальных материалов и конструкций», п. 7 «Постановка и решение краевых задач для тел различной конфигурации и структуры при механических, электромагнитных, радиационных, тепловых и прочих воздействиях, в том числе применительно к объектам новой техники».

По содержанию диссертации имеются следующие **замечания**:

1. При решении задач о деформировании под действием перегрузки и анализе колебаний отсутствует анализ соответствия модельных граничных условий реальным условиям закрепления кромок.

2. Остаётся неясным, можно ли получить аналитическое решение задачи о деформации под действием осевой нагрузки при других вариантах граничных условий, например, при шарнирно закреплённой кромке.

3. Недостаточно освещена дискретная модель, использованная для верификации. Это вызывает вопрос, не являются ли заниженные оценки прогибов по сравнению с экспериментом следствием неучета низкой жесткости поперечного сдвига рёбер.

4. Исследование было бы более полным, если бы для полученных аналитических решений были определены области их адекватности.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не снижают научную и практическую значимость проведённого исследования, направленного на разработку методов постановки и методов решения краевых задач для прогноза поведения сетчатых конструкций из полимерных композиционных материалов при механических воздействиях и подтверждённого результатами вычислительного и физического эксперимента.

Заключение

Оценивая работу в целом, следует отметить ее высокий научный уровень, обоснованность решений, доказательность изложения их в тексте диссертации, актуальность и ценность результатов, как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Диссертационная работа Шатова Александра Владимировича, представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, соответствует критериям разд. II Положения о присуждении ученых степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение актуальной научно-технической задачи оценки жесткости и собственных частот колебаний композитных сетчатых корпусов

