

## ОТЗЫВ

официального оппонента Болдырева Андрея Вячеславовича  
на диссертацию Тереховой Елены Сергеевны  
«Рациональное проектирование панелей из слоистого композиционного материала по условиям прочности и устойчивости», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

### **Актуальность темы диссертационной работы**

В конструкции современных летательных аппаратов широко применяются композиционные материалы, позволяющие повысить весовую эффективность и конкурентоспособность изделий. При оптимизации элементов конструкций из полимерных композиционных материалов одним из важнейших параметров, определяющих несущую способность и массу, является схема укладки волокон в композитной панели. В тонкостенных конструкциях, для которых нагрузки потери устойчивости являются определяющими, важно не только количество и процентное соотношение слоёв с определёнными углами ориентации, но и последовательность укладки этих слоёв в пакете. На критические нагрузки общей потери устойчивости панелей существенно влияют количество и высота стрингеров. Комплексный выбор оптимальных параметров композитного пакета с учётом требований прочности и устойчивости — весьма ресурсоёмкая задача.

Оценка прочности и устойчивости с помощью аналитических выражений позволяет упростить алгоритм выбора оптимальных параметров панелей из композиционных материалов и повысить его вычислительную эффективность. При оценке общей потери устойчивости подкреплённых панелей часто стрингерный набор принято учитывать с помощью эквивалентной жесткости, что не позволяет оценить потерю устойчивости стрингера. Учёт изгибно-крутильной потери устойчивости стрингера позволяет уточнить критические нагрузки общей потери устойчивости.

Таким образом, разработка численно-аналитического алгоритма для выбора рациональных параметров композитных панелей минимального веса по условиям прочности и устойчивости, получение аналитического решения для оценки устойчивости стрингерных панелей из слоистого композита с учётом дискретного расположения стрингеров и их изгибно-крутильной потери устойчивости являются актуальными научными задачами.

### **Анализ содержания диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 145 наименований и трех приложений. Общий объем основной части составляет 140 страниц и включает 56 рисунков и 38 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, обозначены научная новизна и практическая значимость результатов работы. Приведено краткое описание текущего уровня разработанности проблемы в литературе.

В первой главе рассмотрены этапы развития науки об устойчивости конструкций, приведены методы оптимизации авиационных конструкций из ПКМ, проведён анализ возможностей, достоинств и недостатков существующих подходов и алгоритмов проектирования композитных панелей.

Во второй главе приведены аналитические решения для оценки прочности и устойчивости панелей из ПКМ. Прочность композитного пакета панели оценивается по критерию максимальной интенсивности деформаций при плоском напряженном состоянии, а для аналитического определения критических потоков был использован энергетический принцип. В полученных выражениях для стрингерных панелей учтено взаимное влияние деформирования обшивки и изгибно-крутильного деформирования стрингеров.

В третьей главе представлен алгоритм выбора рациональных параметров панелей из ПКМ, обеспечивающих минимальную массу панели и удовлетворяющих условиям прочности и устойчивости. Оптимизация проводится для симметричных по толщине укладок. Для решения задачи выбран метод покоординатного спуска. Алгоритм позволяет получить панели минимальной массы и максимальной жёсткости с учётом технологических ограничений и с ограничением на сбалансированность для предотвращения коробления.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований несущей способности панелей, полученных с помощью разработанного алгоритма оптимизации. Для прогнозирования несущей способности образцов разработаны их конечно-элементные модели совместно с оснасткой для испытаний. Приведено сравнение критических сил стрингерных образцов, полученные при моделировании, и разрушающая нагрузка при испытаниях образцов стрингерных панелей на сжатие. Получено хорошее соответствие расчёта с экспериментом. Проведено исследование зависимости коробления панелей от симметрии, сбалансированности и количества слоев в укладках.

В пятой главе представлены исследования влияния различных параметров на несущую способность и массу панелей из слоистых композиционных материалов. Оценено влияние установки стрингеров на массу панелей. Показано, что установка стрингеров позволяет уменьшить массу панели более чем в полтора раза. Продемонстрировано влияние процедуры балансировки (для исключения коробления) на толщину и несущую способ-

ность панелей получены укладки, интенсивность деформаций и факторы потери устойчивости стрингерной панели.

В заключении приведены основные выводы, сформулированные на основе результатов, полученных при выполнении диссертационной работы, изложены дальнейшие планы по развитию темы исследований.

### **Оценка научной новизны**

Научная новизна диссертационной работы состоит из разработанного алгоритма выбора рациональных параметров панелей из ПКМ, нагруженных комбинацией продольного, поперечного и сдвигового потоков.

Алгоритм позволяет получить укладку, высоту и количество стрингеров, которые обеспечивают минимальный вес панели при ограничениях по прочности и устойчивости, полученных аналитических решений задачи устойчивости подкрепленной панели из композиционного материала с учётом дискретного расположения стрингеров и деформирования стрингера совместно с обшивкой. Это позволяет учитывать изгибно-крутильную потерю устойчивости стрингеров.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке алгоритма выбора рациональных параметров неподкрепленных и стрингерных композитных панелей минимального веса, нагруженных продольными, поперечными и сдвиговыми нагрузками, при ограничениях по прочности и устойчивости. Алгоритм даёт возможность получить рациональное количество слоёв, направление и их последовательность в пакете при проектировании панелей из слоистого композита. Для ускорения работы алгоритма получены аналитические решения задачи устойчивости неподкрепленных и стрингерных композитных панелей с учётом дискретного расположения стрингеров и деформирования стрингера совместно с обшивкой при различных граничных условиях.

**Практическая значимость работы** заключается в разработанном программном обеспечении для выбора параметров панелей из слоистого композита, обеспечивающих минимальную массу и максимальную мембранную жёсткость панелей.

Получены аналитические и численные результаты исследования влияния на массу и несущую способность конструктивных параметров панелей из слоистых композиционных материалов (использование сбалансированной и несбалансированной укладок композиционного пакета, применение в укладках слоёв с различными углами армирования и отклонения толщин, связанных с допусками при поставке препрегов и усадкой при отверждении изделий из ПКМ).

Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ФАУ «СибНИА им. С.А. Чаплыгина».

на», при проектировании панелей отъёмной части крыла учебно-тренировочного самолета «Танго» в ООО «Проект Виктори» (входит в S7 Group) и в учебном процессе на факультете летательных аппаратов Новосибирского государственного технического университета.

### **Достоверность научных положений, выводов и результатов работы**

Достоверность результатов обеспечивается корректным использованием метода конечных элементов, подтверждается экспериментальными исследованиями, проведенными в ФАУ «СибНИА им. С. А. Чаплыгина».

Обсуждение полученных результатов на специализированных конференциях, публикации в научных журналах подтверждают обоснованность и достоверность научных положений и выводов.

Результаты диссертационной работы апробированы на научных конференциях и опубликованы в 12 работах, в том числе в 4 статьях из перечня изданий, рекомендованных ВАК. Результаты диссертации в публикациях отражены достаточно полно.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.5.14 — «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов» в части пунктов 2 — «Обеспечение прочности объектов авиационной, ракетной и космической техники на основе современных аналитических и численных методов, методов натурного и полунатурного моделирования в условиях стационарных и нестационарных внешних воздействий» и 6 — «Организация, экономика и оптимизация процессов обеспечения прочности, термopрочности и тепловых режимов летательных аппаратов».

### **Оценка изложения материалов диссертации и автореферата**

Материал, изложенный в диссертации, понятен, логичен, хорошо структурирован. Проведенные исследования можно считать завершенными. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

По диссертации имеются следующие замечания:

1. В разработанном алгоритме выбора рациональных параметров панелей из ПКМ в шаге 2 производится учёт критического значения потери устойчивости панели. В то же время не используется информация о второй и последующих формах потери устойчивости упругой системы. При определённых условиях это может приводить к осцилляции процесса оптимизации.
2. В третьей главе диссертации приводятся результаты работы алгоритма выбора рациональных параметров панелей из ПКМ, нагруженных комбинацией продольного, поперечного и сдвигового потоков. Приведённые в работе результаты не позволяют полностью оценить точность работы алгоритма при различных комбинациях указанных силовых факторов.

3. В диссертации используется термин «верификация аналитического решения». Однако из текста не ясно, что является эталоном. В работе используются результаты конечно-элементного моделирования, которые, в свою очередь, требуют анализа достоверности.

Указанные замечания и недостатки не снижают научную и практическую значимость диссертационной работы.

### Заключение

Диссертация Тереховой Елены Сергеевны «Рациональное проектирование панелей из слоистого композиционного материала по условиям прочности и устойчивости» является законченной научно-квалификационной работой и содержит новые научные и практические результаты, направленные на развитие методов проектирования элементов авиационных конструкций из ПКМ минимальной массы. Представленная работа полностью соответствует всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым в разделе II, п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ (Постановление Правительства № 842 от 24 сентября 2013 г.), а её автор — Терехова Елена Сергеевна — заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 — Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Официальный оппонент: доктор технических наук (по специальности 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов), доцент, заведующий кафедрой конструкции и проектирования летательных аппаратов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва»

Болдырев Андрей Вячеславович

443086, Россия, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34.  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Самарский национальный  
исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Поступил в совет 20.11.2025  / Терехова Е.С.  
Сотрудник ознакомлен 02.12.2025 Т.С. Терехова Е.С.