

На правах рукописи



Терехова Елена Сергеевна

**РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАНЕЛЕЙ  
ИЗ СЛОИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА  
ПО УСЛОВИЯМ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ**

Специальность 2.5.14 — «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск — 2025

Работа выполнена в Федеральном автономном учреждении «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина»

Научный руководитель: **Юрий Иванович Бадрухин**  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты: **Болдырев Андрей Вячеславович**,  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королева»,  
Кафедра конструкции и проектирования летательных  
аппаратов, заведующий кафедрой.

**Карпов Евгений Викторович**  
доктор физико-математических наук, член-  
корреспондент Российской академии наук, профессор  
Российской академии наук, Федеральное  
государственное бюджетное учреждение науки  
«Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева  
Сибирского отделения Российской академии наук»,  
Лаборатория моделирования гетерофазных  
материалов, главный научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное автономное учреждение «Центральный  
аэрогидродинамический институт имени профессора  
Н.Е. Жуковского», г. Жуковский.

Защита диссертации состоится «18» декабря 2025 г. в 14<sup>00</sup> на заседании  
диссертационного совета 24.2.347.03 при ФГБОУ ВО «Новосибирский  
государственный технический университет» по адресу 630073; г. Новосибирск,  
пр-т Карла Маркса, д. 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Новосибирский  
государственный технический университет» и на сайте диссертационного совета:  
[https://www.nstu.ru/science/dissertation\\_sov/dissertations?id=303](https://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations?id=303)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ октября 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент

Андрей Геннадиевич Тюрин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

В самолетостроении, наряду с безопасностью и экологичностью, актуальной является проблема уменьшения веса конструкции, поскольку от него зависит скорость самолета, дальность его полета, расход топлива, что в конечном итоге влияет на стоимость летного часа.

В авиастроении для снижения веса используются полимерные композиционные материалы (ПКМ), обладающие высокой удельной прочностью, высокими усталостными характеристиками и низким весом. Однако тонкостенные оболочки, такие как крыльевые панели и обшивка фюзеляжа, могут терять несущую способность в результате потери устойчивости до достижения предела прочности материала.

Подбор рациональных параметров конструкции из ПКМ по условиям устойчивости — сложная задача. Размеры панелей, укладка армирующих слоев (в композитах), количество и высота стрингеров существенно влияют на критические нагрузки общей и местной потери устойчивости. Изменение любого из этих параметров приводит к изменению критической нагрузки и требует контроля и по общей, и по локальной устойчивости, устойчивости стрингера и прочности.

Таким образом, разработка экономичного и быстрого численно-аналитического алгоритма выбора рациональных параметров (АВРП) панели, таких как укладка слоев в панели и стрингерах, количество и высота стрингеров, обеспечивающих прочность и общую и местную устойчивость, является актуальной задачей.

### **Степень разработанности темы исследования**

Оптимизации элементов авиационных конструкций посвящены работы В. М. Фролова, К. М. Иерусалимского, Н. В. Пустового, И. П. Олегина, Л. П. Железнова, В. И. Бутырина, Ю. И. Бадрухина, в которых используются различные методы и постановки задач. Некоторые работы Ю. В. Немировского посвящены решению проблемы оптимизации гибридных композитных стержней при взрывных нагрузках. В работах О. В. Митрофанова рассматриваются проблемы оптимизации панелей после потери устойчивости. Работы А. В. Болдырева, В. А. Комарова, К. А. Балунова, Ф. З. Ишмуратова, А. А. Дудченко и Р. Р. А. Канчая, П. В. Просунцова, Л. Х. Туна посвящены выбору рациональных параметров авиационных конструкций с помощью топологической оптимизации.

Рациональное расположение слоев в укладке и влияние расположения слоев на устойчивость исследовано в работах С. В. Грищенко, К. В. Михайловского, С. В. Барановски, Н. А. Морозова, Ю. Л. Власова, А. А. Гаврилова, Н. М. Янга, Ч. Т. Аунга, М. И. Мартиросова, Л. Н. Рабинского. В работах L. Xiaoyang, C. A. Featherston, D. Kennedy, F. X. Irisarri, D. H. Bassir, N. Carrere, J. F. Maire для получения оптимальной укладки используется генетический алгоритм. В работе А. Р. Хазиева подробно описывается процесс выбора рационального расположения слоев, обеспечивающего оптимальную толщину композитной панели с учетом прочности, жесткости и устойчивости. Рассмотрены сдвиговые нагрузки и сжатие в продольном и поперечном направлении. Для описания ограничений по устойчивости используется метод аппроксимации критической поверхности. В работе В. А. Киреева, И. А. Комарова также представлен алгоритм выбора

оптимальной укладки слоев в стрингерной панели. Стрингерный набор в качестве упрощения учитывается с помощью эквивалентной жесткости.

В большинстве рассмотренных работ акцент сделан на прочность слоев в пакете, а решения задачи устойчивости нуждаются в уточнении.

**Целью диссертационной работы** является разработка алгоритма выбора рациональных параметров композитных панелей минимального веса по условиям прочности и устойчивости.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд научно-технических задач:

1. Получение аналитического решения для оценки устойчивости неподкрепленных и стрингерных панелей из слоистого композита при действии продольного, поперечного и сдвигового потоков.

2. Верификация аналитического решения для оценки устойчивости неподкрепленных и стрингерных панелей из слоистого композита при действии продольного, поперечного и сдвигового потоков.

3. Разработка программы, реализующей численно-аналитический алгоритм выбора рациональных параметров неподкрепленных и стрингерных панелей из слоистого композиционного материала, нагруженных продольным, поперечным и сдвиговым потоками.

4. Тестирование алгоритма выбора рациональных параметров панелей из слоистого композита с помощью численных и экспериментальных методов.

5. Исследование параметров, влияющих на массу и несущую способность панелей из слоистого композита.

### **Научная новизна работы**

1. Разработан алгоритм выбора рациональных параметров неподкрепленных и стрингерных панелей из слоистого композиционного материала, нагруженных продольным, поперечным и сдвиговым потоками. Алгоритм позволяет получить укладку, высоту и количество стрингеров, которые обеспечивают минимальный вес панели при ограничениях по прочности и устойчивости.

2. Получено аналитическое решение задачи устойчивости подкрепленной панели из композиционного материала с учетом дискретного расположения стрингеров и деформирования стрингера совместно с обшивкой, что позволяет учитывать их изгибно-крутильную потерю устойчивости (такая потеря устойчивости реализуется при избыточном увеличении высоты стрингерного набора).

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

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Разработанный АВРП неподкрепленных и стрингерных композитных панелей минимального веса, нагруженных продольными, поперечными и сдвиговыми нагрузками, при ограничениях по прочности и устойчивости дает возможность

получить необходимое количество слоев, направление и их полную последовательность в пакете при проектировании панелей из слоистого композита.

Для ускорения работы АВРП получены аналитические решения задачи устойчивости неподкрепленных и стрингерных композитных панелей с учетом дискретного расположения стрингеров и деформирования стрингеров совместно с обшивкой при граничных условиях опирания и защемления.

Алгоритм реализован в виде компьютерного программного обеспечения для выбора параметров панелей из слоистого композита, обеспечивающих минимальную массу и максимальную мембранную жесткость панелей.

### **Методология и методы исследования**

АВРП основан на методе покоординатного спуска. Решение задачи устойчивости получено с использованием энергетического метода. Для оценки критических нагрузок и деформаций панелей применен метод конечных элементов (МКЭ) и экспериментальные исследования.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Аналитическое решение задачи устойчивости неподкрепленных и стрингерных композитных панелей при граничных условиях шарнирного опирания и защемления, нагруженных продольными, поперечными и сдвиговыми потоками.

2. Численно-аналитический алгоритм выбора параметров, обеспечивающих минимальную массу и максимальную мембранную жесткость неподкрепленных и стрингерных слоистых композитных панелей при ограничениях по условиям прочности и устойчивости, и компьютерная программа для его реализации.

3. Результаты исследования влияния на массу и несущую способность конструктивных параметров панелей из слоистых композиционных материалов.

### **Степень достоверности и апробация результатов работы**

Достоверность результатов подтверждается экспериментальными исследованиями, проведенными в ФАУ «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина», и результатами конечно-элементного анализа в широко используемой среде численного анализа ANSYS и Femap with NX Nastran.

Результаты работы по тематике исследования были представлены на следующих научных конференциях: Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 80-летию ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», г. Новосибирск, 2021; Научно-техническая конференция, посвященная 120-летию Н.И. Камова, Москва, 2022; XII Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова, Москва, 2022; XVI Всероссийская научная конференция с международным участием «Краевые задачи и математическое моделирование», Новокузнецк, 2022; Научно-техническая конференция «Прочность конструкций летательных аппаратов-2022», Жуковский, 2022; XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, Санкт-Петербург, 2023; Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов», Новосибирск, 2023; Международная научно-практическая конференция «IX Чаплыгинские чтения», Новосибирск, 2024; II Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов «Аэродинамика, динамика полета, прочность и конструирование летательных

аппаратов», Новосибирск, 2024; Научно-техническая конференция «Прочность конструкций летательных аппаратов», Жуковский, 2024.

**Личный вклад автора** включает: реализацию решения задачи устойчивости при комбинированной нагрузке стрингерных панелей из слоистого композита, разработку алгоритма выбора рациональных параметров панелей из слоистого композита; верификацию аналитических решений; построение расчетных моделей образцов стрингерных панелей совместно с оснасткой для испытаний, обработку результатов натурных испытаний и численного моделирования и их анализ.

#### **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 натурального и полунатурного моделирования в условиях стационарных и нестационарных внешних воздействий» и 6 — «Организация, экономика и оптимизация процессов обеспечения прочности, термочечности и тепловых режимов летательных аппаратов».

#### **Публикации**

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 12 печатных работах, из них 4 — в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

#### **Структура и объем 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.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**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.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена обзору развития науки об устойчивости конструкций, методам оптимизации и подходам к проектированию элементов авиационных конструкций из ПКМ по условиям прочности и устойчивости.

Выполнен анализ возможностей, достоинств и недостатков существующих подходов и алгоритмов проектирования изделий из композиционных материалов. Показана актуальность разработки алгоритма, позволяющего снизить трудоемкость получения параметров панелей, отвечающих требованиям устойчивости и прочности при минимальном весе.

**Во второй главе** приведены аналитические решения для оценки прочности и устойчивости панелей из ПКМ. Схема панели представлена на рисунке 1.

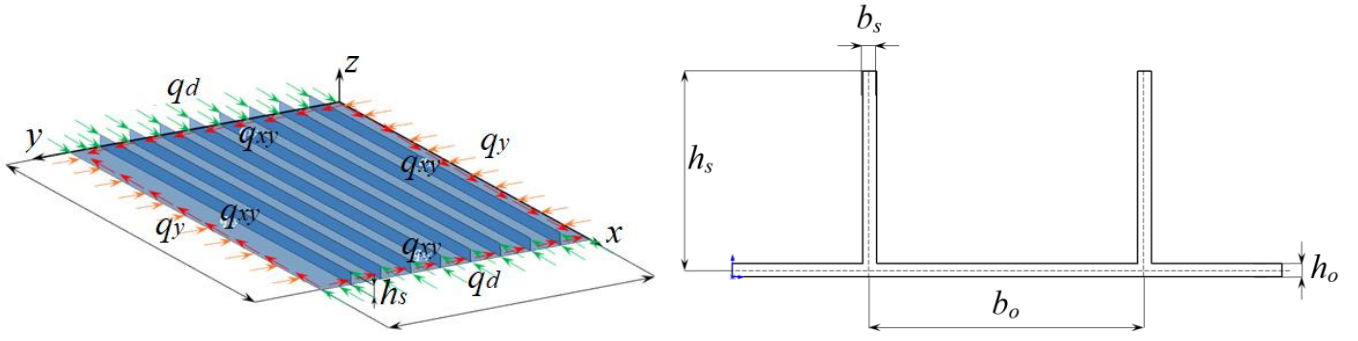


Рисунок 1 — Расчетная схема стрингерной панели

Прочность композитного пакета панели оценивается по критерию максимальной интенсивности деформаций при плоском напряженном состоянии

$$\varepsilon_i \leq \varepsilon_{ib}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_i$  — интенсивность деформации, которая определяется выражением

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + \frac{3}{2} \cdot \gamma_{xy}^2}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_{yx} \cdot \frac{\sigma_y}{E_y}, \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \nu_{xy} \cdot \frac{\sigma_x}{E_x}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad \varepsilon_z = -\nu_z \left( \frac{\sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} \right), \quad (3)$$

$$\nu_{xy} = \frac{E_x}{E_y} \cdot \nu_{yx}.$$

Представив напряжения через потоки сил  $q_x$ ,  $q_y$  и  $q_{xy}$ , получим:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3 \cdot h} \cdot \sqrt{F_i}, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} F_i = & \left( \frac{q_x}{E_x} \right)^2 \cdot \left( (1 + \nu_{xy})^2 + (\nu_z - \nu_{xy})^2 + (1 + \nu_z)^2 \right) + \\ & + \left( \frac{q_y}{E_y} \right)^2 \cdot \left( (1 + \nu_{yx})^2 + (1 + \nu_z)^2 + (\nu_z - \nu_{yx})^2 \right) + \\ & + 2 \cdot \frac{q_x}{E_x} \cdot \frac{q_y}{E_y} \cdot \left( 2 \cdot \nu_z^2 + 2 \cdot \nu_z - (\nu_{xy} + \nu_{yx}) \cdot (\nu_z + 2) - 1 \right) + \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{q_{xy}}{G} \right)^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $\varepsilon_{ib}$  — предельное значение интенсивности деформации;  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_z$  — линейные деформации в направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$ ;  $\gamma_{xy}$  — сдвиговые деформации в плоскости  $xy$ ;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  — нормальные напряжения в направлениях  $x$  и  $y$ ;  $\tau_{xy}$  — касательные напряжения в плоскости  $xy$ ;  $E_x$ ,  $E_y$  — модули упругости в направлениях  $x$  и  $y$ ;  $G$  — модуль сдвига;  $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{yx}$ ,  $\nu_z$  — коэффициенты Пуассона;  $q_x$ ,  $q_y$ ,  $q_{xy}$  — потоки сил (потоки представляют собой силу, распределенную по ширине сечения)

в направлениях  $x$ ,  $y$  и в плоскости  $xy$ . При этом для стрингерной панели продольная погонная сила  $q_d$  выражается через поток  $q_d = \frac{q_x}{1 + \frac{h_s \cdot n_s}{B}}$ .

Толщина пакета  $h$ , необходимая для обеспечения прочности, определяется из (1)

$$h = \frac{\sqrt{2}}{3 \cdot \varepsilon_{ib}} \cdot \sqrt{F_i} \quad (6)$$

Для аналитического определения критических потоков был использован энергетический принцип

$$\delta\Pi = \delta U - \lambda \cdot \delta A = 0 \quad (7)$$

где  $U$  — потенциальная энергия деформации панели,  $A$  — работа внешних сил.

Рассмотрены случаи опирания и защемления панели по контуру,  $\lambda$  — коэффициент пропорциональности внешних нагрузок, достигающий критического значения при  $\delta\Pi = 0$ . Далее по тексту  $\lambda$  называется фактором потери устойчивости.

В общем виде выражение для определения фактора потери устойчивости принимает вид:

$$\lambda = \frac{U_o + U_s}{A} \quad (8)$$

где

$$U_o = - \left[ D_{11} \cdot \alpha_4 \cdot kn + D_{22} \cdot \beta_4 \cdot km + 2 \cdot D_3 \cdot \alpha_2 \cdot \beta_2 - \frac{ao_{12}^2 \cdot ao_{33} + ao_{13}^2 \cdot ao_{22} - 2 \cdot ao_{12} \cdot ao_{13} \cdot ao_{23}}{ao_{22} \cdot ao_{33} - ao_{23}^2} \right],$$

$$U_s = \frac{h_s^3 \cdot \alpha_4}{3 \cdot B} \cdot \frac{E_{11} \cdot h \cdot \Sigma c \cdot \Sigma \varepsilon}{1 + \frac{\Sigma \varepsilon \cdot E_{11} \cdot \alpha_2 \cdot h_s^2}{G}} + \left( as_{11} - \frac{as_{12}^2 \cdot as_{33} + as_{13}^2 \cdot as_{22} - 2 \cdot as_{12} \cdot as_{13} \cdot as_{23}}{as_{22} \cdot as_{33} - as_{23}^2} \right) \cdot \frac{h_s}{B} \cdot \Sigma s$$

$$A = \frac{q_1 \cdot \alpha_2 \cdot kn}{1 + \frac{h_s \cdot n_s}{B}} \cdot \left( 1 + \frac{h_s}{B} \cdot \left( \Sigma c + \frac{h_s^2}{3} \cdot \Sigma s \right) \right) + q_2 \cdot \beta_2 \cdot km + q_{12} \cdot R \cdot k.$$

$U_o$  — энергия дополнительной деформации изгиба обшивки в процессе потери устойчивости,  $U_s$  — энергия дополнительной деформации изгиба стрингеров,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_4$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_4$ ,  $ao$ ,  $as$  и др. — параметры, зависящие от жесткости, размеров и условий закрепления панели (рассмотрены случаи опирания и защемления по контуру). Выражения для них не приведены ввиду громоздкости. Действие сдвигового потока в задаче для защемленной стрингерной панели не рассмотрено.

Энергии деформации обшивки  $U_o$  и стрингеров  $U_s$  используются в предположении, что изгиб происходит в рамках гипотезы плоских сечений с постоянным сдвигом по толщине.

Приравняв к нулю высоту и количество стрингеров, получим выражения для неподкрепленных панелей.

Решение реализовано компьютерной программой.

Для верификации аналитического решения было проведено сравнение критических нагрузок с критическими нагрузками, полученными с помощью МКЭ.



Материал панелей — ACM102-C130UD с механическими характеристиками, представленными в таблице 1.

Таблица 1 — Механические характеристики материала ACM102-C130UD

| $E_x$ , ГПа | $E_y$ , ГПа | $E_{xy}$ , ГПа | $\nu_{xy}$ | $\nu_z$ | $t_s$ , мм | $\gamma$ , кг/мм <sup>3</sup> |
|-------------|-------------|----------------|------------|---------|------------|-------------------------------|
| 126,33      | 10,39       | 4,90           | 0,34       | 0,30    | 0,13       | $1,56 \cdot 10^{-6}$          |

Для примера в таблице 2 приведены размеры панели, укладки, нагрузки и факторы потери устойчивости для стрингерных панелей при различных граничных условиях.

Таблица 2 — Сравнение аналитического решения и МКЭ для стрингерной панели

| $q_x, q_y,$<br>Н/мм                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | $h$ , мм | $h_s$ ,<br>мм | $n_s$ | $\lambda_{\text{теор}}$ | $\lambda_{\text{МКЭ}}$ | $\delta$ ,<br>% | $h$ , мм                                                            | $h_s$ ,<br>мм | $n_s$ | $\lambda_{\text{теор}}$ | $\lambda_{\text{МКЭ}}$ | $\delta$ ,<br>% |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------|-------|-------------------------|------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------|---------------|-------|-------------------------|------------------------|-----------------|
| опирание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |          |               |       |                         |                        |                 | защемление                                                          |               |       |                         |                        |                 |
| $L = 700$ мм, $B = 250$ мм                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |          |               |       |                         |                        |                 |                                                                     |               |       |                         |                        |                 |
| –981, 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 4,16     | 20            | 5     | 1,01                    | 0,98                   | –3              | 2,60                                                                | 20            | 5     | 1,03                    | 1,18                   | 12,7            |
| [(90) <sub>6</sub> /(0) <sub>10</sub> ] <sub>s</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |          |               |       |                         |                        |                 | [90/(0) <sub>9</sub> ] <sub>s</sub>                                 |               |       |                         |                        |                 |
| –981, –196                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 5,98     | 20            | 3     | 1,00                    | 1,01                   | 1,0             | 3,64                                                                | 20            | 3     | 1,02                    | 1,10                   | 7,3             |
| [(90) <sub>8</sub> /±45/(0) <sub>2</sub> /45/(0) <sub>10</sub> ] <sub>s</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |          |               |       |                         |                        |                 | [(90) <sub>6</sub> /(0) <sub>8</sub> ] <sub>s</sub>                 |               |       |                         |                        |                 |
| $L = 700$ мм, $B = 500$ мм                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |          |               |       |                         |                        |                 |                                                                     |               |       |                         |                        |                 |
| –981, 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 9,62     | 15            | 7     | 1,00                    | 0,97                   | –3,1            | 5,98                                                                | 15            | 7     | 1,01                    | 1,08                   | 6,5             |
| [(±45) <sub>4</sub> /45/(90) <sub>3</sub> /(0) <sub>3</sub> /(90) <sub>3</sub> /(0) <sub>19</sub> ] <sub>s</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                           |          |               |       |                         |                        |                 | [90/90/(0) <sub>21</sub> ] <sub>s</sub>                             |               |       |                         |                        |                 |
| –981, –<br>196                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 10,92    | 22            | 4     | 1,00                    | 1,14                   | 14,0            | 5,72                                                                | 22            | 4     | 1,00                    | 1,07                   | 6,5             |
| [(±45) <sub>3</sub> /90/–45/90/±45/45/90/0/90/0/0/90/(0) <sub>24</sub> ] <sub>s</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |          |               |       |                         |                        |                 | [90/45/90/(0) <sub>13</sub> /90/(0) <sub>4</sub> /–45] <sub>s</sub> |               |       |                         |                        |                 |
| Примечание: $L$ — длина панели; $B$ — ширина панели; $h$ — толщина панели и стрингера; $h_s$ — высота стрингера; $n_s$ — количество стрингеров; $\lambda_{\text{теор}}$ — фактор потери устойчивости в аналитическом решении; $\lambda_{\text{МКЭ}}$ — фактор потери устойчивости, полученный из конечно-элементного анализа; $\delta$ — различие между $\lambda_{\text{МКЭ}}$ и $\lambda_{\text{теор}}$ . |          |               |       |                         |                        |                 |                                                                     |               |       |                         |                        |                 |

На рисунке 2 приведены первые формы потери устойчивости и соответствующие им факторы потери устойчивости для панели с размерами  $700 \times 250$  мм, нагруженной продольным потоком –981 Н/мм и поперечным потоком –196 Н/мм при различных граничных условиях (см. таблицу 2), полученные с помощью МКЭ.

Для опертой панели отличие фактора, полученного в аналитическом решении, и фактора, полученного с помощью МКЭ, составило 1,0 %, для защемленной панели — 7,3 %.

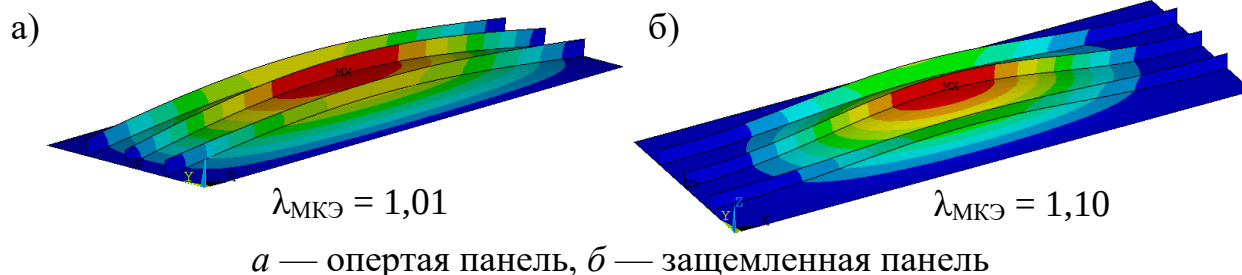


Рисунок 2 — Первая форма потери устойчивости стрингерной панели с размерами  $700 \times 250$  мм, нагруженной продольным потоком –981 Н/мм и поперечным потоком –196 Н/мм

**В третьей главе** представлен АВРП неподкрепленных и стрингерных панелей из слоистого композита, обеспечивающих минимальную массу панели и удовлетворяющих условиям прочности и устойчивости.

Под рациональным проектированием в данном случае понимается проектирование панелей из ПКМ при соблюдении ограничений по прочности и устойчивости, а также технологических ограничений, таких как заданная толщина монослоя, симметрия и сбалансированность укладки. При этом целевыми функциями при оптимизации являются масса и жесткость панели.

При оценке несущей способности панели из слоистого композита принято, что удельный вес материала для всей панели постоянный, толщина обшивки и стрингеров одинаковая, габариты панели постоянные, следовательно, вес панели пропорционален толщине  $h_0 = f(L, B, h_s, \dots, \varphi)$  и зависит от размера панели, количества и высоты стрингеров, нагрузки, марки препрега и укладки слоев. Задача рационального проектирования сводится к нахождению  $\min h_0$  при заданных ограничениях по прочности  $\varepsilon_i \leq \varepsilon_{ib}$  и устойчивости  $\lambda \geq 1$ .

Поскольку напрямую выразить целевую функцию и ее производную затруднительно, для решения задачи выбран метод покоординатного спуска. В качестве координаты принято положение слоя в укладке. Спуск осуществляется в рамках заданного базиса возможных направлений слоев. Внутри алгоритма покоординатного спуска осуществляется изменение толщины для текущей укладки по условию прочности и устойчивости методом итераций.

Алгоритм выбора рациональных параметров панелей из слоистого композита включает следующие шаги:

#### *Шаг 1. Формирование пакета минимального веса по прочности*

На начальном этапе задаются исходные данные: базис возможных направлений слоев в укладке; начальная укладка и количество слоев. Рассмотрены укладки симметричные по толщине, т. е. каждый слой выше плоскости симметрии одинаково соответствует (в плане положения, ориентации и механических свойств) слою ниже плоскости симметрии.

В двойном цикле по слоям и направлениям базиса для каждого слоя происходит выбор угла из базиса возможных направлений и для каждой укладки вычисляется толщина, необходимая для обеспечения прочности.

Результатом данного шага является укладка, дающая минимальную толщину при заданной комбинации нагрузок. Стоит отметить, что на первом шаге количество слоев остается постоянным и при изменении общей толщины пакета изменяется толщина монослоя.

#### *Шаг 2. Формирование пакета минимального веса по устойчивости*

В качестве исходных данных на этом шаге задаются укладка и толщина панели, которые получены на шаге 1. Затем по соотношению (8) определяется фактор потери устойчивости  $\lambda$ .

В знаменателе (8) находится работа внешних сил, а в числителе — энергия деформации изгиба панели, которая зависит от  $h^3$ . При  $\lambda < 1$ , когда комбинация действующих нагрузок превышает критический уровень, эта зависимость позволяет за несколько итераций увеличить толщину панели до нового значения, отвечающего равенству  $\lambda = 1$ , с помощью соотношения (9).

$$h_{\text{нов.}} = \frac{h}{\sqrt[3]{\lambda}}. \quad (9)$$

Здесь  $h$  и  $\lambda$  — значения, полученные по результатам шага 1, и всегда  $h_{\text{нов.}} \geq h$ .

Затем в двойном цикле по слоям укладки и направлениям базиса каждый слой последовательно обменивается своим направлением со всеми остальными слоями с одновременным определением толщины по выражению (9) и проверкой по прочности. Из всех сочетаний выбирается то, которое соответствует наименьшей толщине и удовлетворяет ограничению по прочности. Циклический процесс продолжается до подходящего установления значения толщины. Если  $\lambda \geq 1$ , это означает, что полученная укладка обеспечивает помимо прочности еще и устойчивость, т. е. задача решена.

### *Шаг 3. Дискретизация*

На данном шаге корректируется количество слоев укладки с учетом реальной толщины монослоя и полученной общей толщины. Для сохранения запасов по прочности и устойчивости толщина всегда округляется в большую сторону.

### *Шаг 4. Максимизация мембранной жесткости*

В результате округления толщины на шаге 3 в большую сторону неизбежно появляется небольшое превышение ограничений по прочности и устойчивости. Это позволяет сменить целевую функцию и перейти от минимизации веса к максимизации мембранной жесткости при соблюдении ограничений по устойчивости.

На данном шаге фиксируется количество слоев и в цикле по направлениям базиса и по слоям укладки выбирается укладка, дающая наименьшую интенсивность деформации при соблюдении ограничения на устойчивость.

### *Шаг 5. Формирование сбалансированной укладки*

Для предотвращения коробления изделий из ПКМ при отверждении рекомендовано использовать не только симметричные, но и сбалансированные укладки, т. е. укладки, в которых каждый слой  $+\theta$ , измеренный по отношению к нулевому направлению, уравнивается слоем  $-\theta$  того же материала. Для того чтобы скорректировать пакет, полученный на шаге 3 и/или 4, с учетом ограничения на сбалансированность в цикле по слоям подбирается укладка, содержащая в половине симметричного пакета (от края до плоскости симметрии) четное количество слоев с направлением  $|45|^\circ$ . При этом ограничения на прочность и устойчивость сохраняются.

### *Шаг 6. Проверка прочности и устойчивости конструкции*

На данном шаге с помощью МКЭ проводится проверка прочности и устойчивости полученных панелей.

По совпадающим условиям результаты работы алгоритмов были сравнены с результатами, полученными в российских и зарубежных источниках, а также с результатами работы генетического алгоритма, реализованного в Siemens NX 12.

Для неподкрепленных панелей получено хорошее совпадение с результатами, представленными в источниках. Для стрингерных панелей сравнение провести не удалось, ввиду отсутствия источников с подобной постановкой задачи. Таким образом, можно сделать вывод, что разработанный АВРП работает корректно.

Алгоритм реализован в качестве консольного приложения на языке Fortran90. Для этой программы получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680522 от 02.10.2023.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальному исследованию несущей способности панелей, полученных с помощью АВРП. Для этого были изготовлены стрингерные панели с укладками трех типов: укладки первого типа получены в результате работы АВРП; укладки второго типа получены в результате работы АВРП и скорректированы с учетом ограничения на сбалансированность (каждому слою  $45^\circ$  соответствует слой  $-45^\circ$ ); укладки третьего типа имеют процентное соотношение слоев, часто применяющееся в авиационных конструкциях: 50 % слоев с направлением  $0^\circ$ , 40 % слоев с направлением  $\pm 45^\circ$  и 10 % слоев с направлением  $90^\circ$ .

Параметры образцов стрингерной панели представлены в таблице 3.

Таблица 3 — Параметры образцов стрингерной панели

| Тип                                                                                        | $h$ , мм | $h_{\text{стр}}$ , мм | Укладка                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------|------------------------------|
| Тип 1*                                                                                     | 2,34     | 22                    | $[45/(0)_8]_s$               |
| Тип 2**                                                                                    | 2,34     | 22                    | $[\pm 45/(0)_7]_s$           |
| Тип 3                                                                                      | 2,34     | 27                    | $[45/90/-45/0/0/0/45/0/0]_s$ |
| Примечание: * — оптимизированная укладка, ** — оптимизированная и сбалансированная укладка |          |                       |                              |

Схема образца стрингерной панели представлена на рисунке 3.

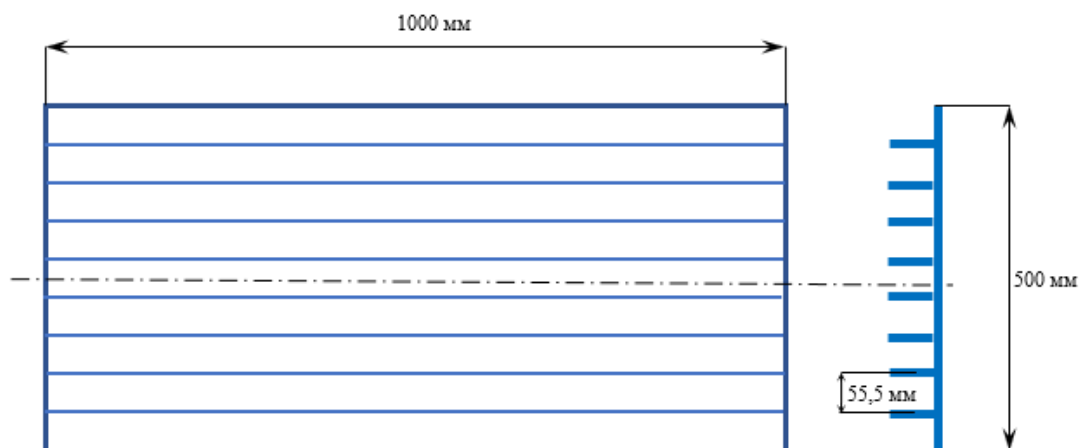
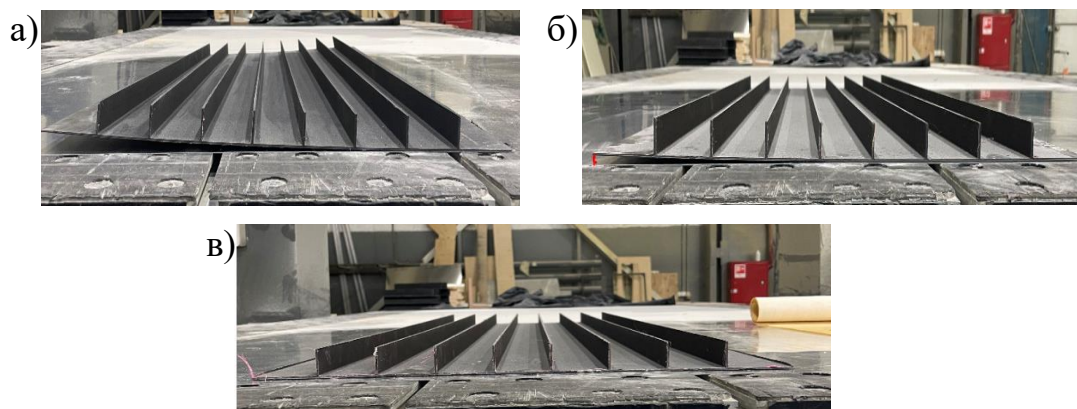


Рисунок 3 — Схема образца стрингерной панели

Фотографии образцов представлены на рисунке 4.



$a$  — тип 1,  $b$  — тип 2,  $v$  — тип 3

Рисунок 4 — Образцы стрингерных панелей

На рисунке 4 видно искривление образцов с несбалансированной укладкой (тип 1 и 3). Проведено исследование зависимости коробления панелей от симметрии, сбалансированности и количества слоев в укладках. Показано, что наиболее эффективным способом минимизации прогибов является использование симметричных и сбалансированных схем укладки армирующих волокон. Использование симметричных несбалансированных укладок позволяет снизить прогибы примерно в два раза по сравнению с несимметричными сбалансированными вариантами. Уменьшение толщины пластины в 2,5 раза приводит к увеличению прогиба более чем в пять раз.

Особое внимание следует уделить точности соблюдения углов укладки армирующих волокон. Отмечено, что даже небольшие отклонения от заданных углов могут привести к существенному изменению прогиба (в четыре раза).

Измерения параметров изготовленных образцов показали, что толщина готовых панелей отличается от расчетной толщины, вычисленной на основе паспортной толщины монослоя. Из открытых источников известно, что в процессе полимеризации связующего в подавляющем большинстве случаев происходит объемная усадка, которая наряду с различиями коэффициентов термического расширения полимерной матрицы и армирующего материала приводит к формированию остаточных напряжений в структуре материала и изменению толщины изделия после отверждения приблизительно на 8–18 %. Такое изменение толщины может оказывать существенное влияние на критические нагрузки для тонкостенных панелей.

Для исследования влияния технологических аспектов на толщину композитных панелей изготовлены образцы с размерами 100 × 100 мм, которые отличаются количеством слоев, укладкой и технологией изготовления. Маркировку «УА» имеют образцы, изготовленные с помощью автоклавного формования, «У» — с помощью вакуумного формования.

На рисунке 5 представлены значения теоретической толщины образца после отверждения, вычисленные по средней паспортной толщине монослоя, фактической толщины до отверждения после опрессовки и фактической толщины после отверждения.

Величина усадки определена как разница между толщинами образцов до отверждения после опрессовки и после отверждения. Усадка для образцов типа «УА» составляет 4–10 %. Для образцов типа «У» получены значения от –6 до 2 %. Знак «–» означает, что после отверждения толщина образца увеличилась. Толщины образцов типа «У» на 5–14 % больше толщин образцов типа «УА». На основании этого можно сделать вывод, что в зависимости от технологии изготовления и партии материала толщина готового изделия может иметь разброс  $\pm 15$  %, что существенно для тонкостенных конструкций, потеря несущей способности которых связана с потерей

устойчивости. Необходимо учитывать эти особенности при проектировании изделий из композиционных материалов.

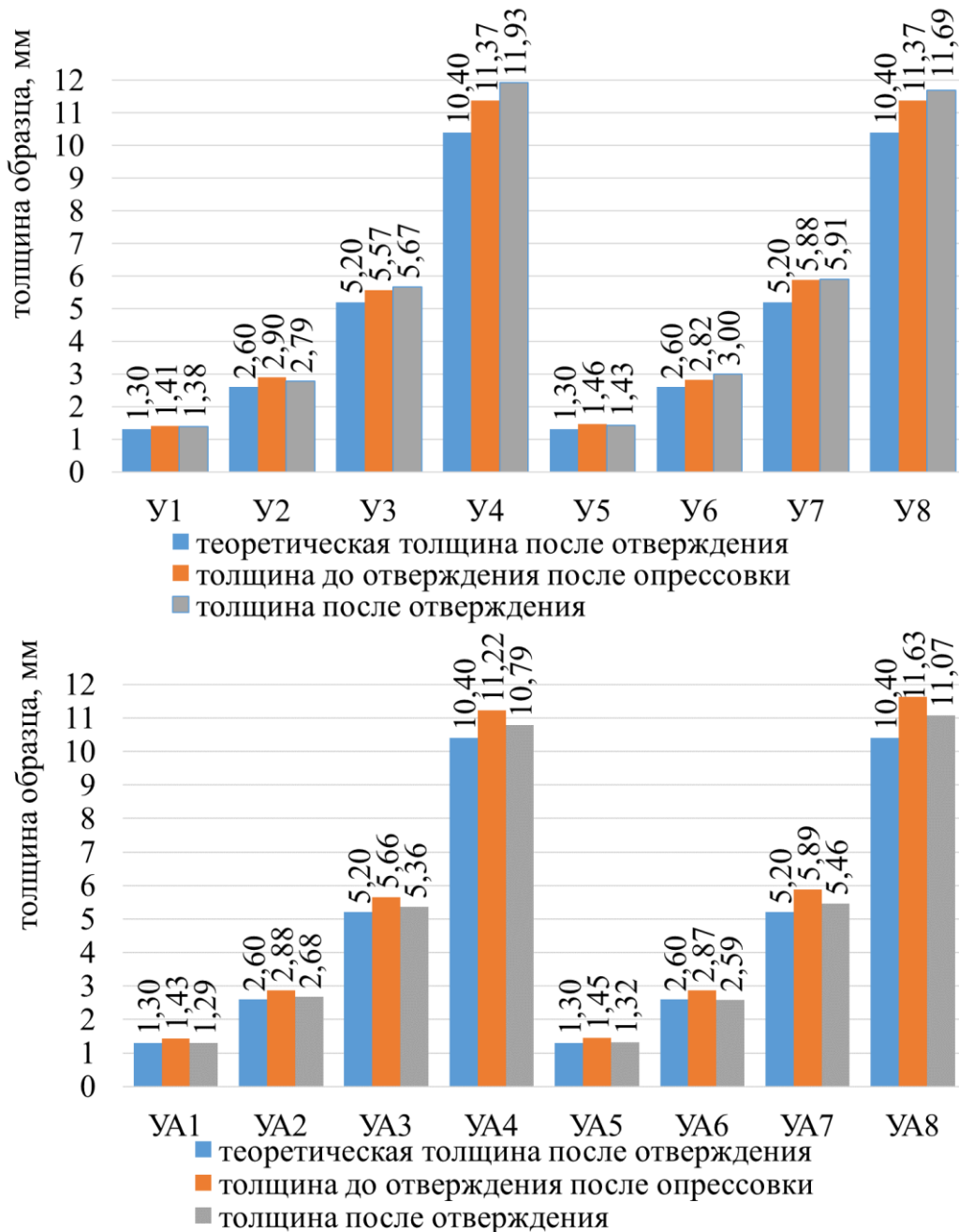


Рисунок 5 — Толщины образцов «У» и «УА»

Проведены испытания образцов стрингерных панелей на сжатие. Для прогнозирования несущей способности образцов были разработаны их конечно-элементные модели (КЭМ) совместно с оснасткой для испытаний. Критические силы стрингерных образцов, с учетом фактической толщины, полученные при моделировании образца в стенде  $P_{кр.стенд.}$ , разрушающая нагрузка при испытаниях  $P_{разр}$  и различие между этими силами  $\delta_{ст.}$  представлены в таблице 4. Знак «—» в таблице означает, что нагрузка в эксперименте меньше, чем нагрузка в КЭМ.

Таблица 4 — Критические силы стрингерных образцов

| Тип       | $P_{разр.}$ , кН | $P_{кр.стенд.}$ , кН | $\delta_{ст.}$ , % |
|-----------|------------------|----------------------|--------------------|
| Тип 1 (1) | 154,55           | 220,33               | –42,56             |
| Тип 1 (2) | 205,94           | 226,98               | –10,22             |

Продолжение таблицы 4

| Тип       | $P_{\text{разр.}}, \text{кН}$ | $P_{\text{кр. ст.}}, \text{кН}$ | $\delta_{\text{ст.}}, \%$ |
|-----------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Тип 2 (1) | 250,07                        | 228,13                          | 8,77                      |
| Тип 2 (2) | 212,80                        | 228,13                          | -7,20                     |
| Тип 3 (1) | 277,53                        | 285,68                          | -2,94                     |
| Тип 3 (2) | 281,45                        | 285,68                          | -1,50                     |

Получено хорошее соответствие расчета с экспериментом. Исключением является только образец типа 1 (1), который имел ярко выраженное начальное коробление.

Для того чтобы продемонстрировать влияние толщины готового изделия на устойчивость, в таблице 5 приведены:  $P_{\text{кр. п.}}$  — критические силы образцов в стенде со средней паспортной толщиной (2,34 мм), полученные с помощью конечно-элементного анализа;  $P_{\text{разр.}}$  (таблица 4) и  $\delta_{\text{п.}}$  — отличие  $P_{\text{кр. п.}}$  от  $P_{\text{разр.}}$ .

Таблица 5 — Критические силы стрингерных образцов при паспортной толщине

| Тип       | $P_{\text{разр.}}, \text{кН}$ | $P_{\text{кр. п.}}, \text{кН}$ | $\delta_{\text{п.}}, \%$ |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Тип 1 (1) | 154,55                        | 265,01                         | -71,47                   |
| Тип 1 (2) | 205,94                        | 265,01                         | -28,68                   |
| Тип 2 (1) | 250,07                        | 254,19                         | -1,65                    |
| Тип 2 (2) | 212,80                        | 254,19                         | -19,45                   |
| Тип 3 (1) | 277,53                        | 388,05                         | -39,82                   |
| Тип 3 (2) | 281,45                        | 388,05                         | -37,88                   |

Из сравнения результатов таблиц 4 и 5, видно, что уменьшение фактической толщины монослоя относительно средней паспортной толщины приводит к уменьшению критической нагрузки на 2–40 %.

Результаты проведенных исследований подтверждают возможность эффективно использовать АВРП для оценки влияния различных параметров на несущую способность и толщину панелей из композиционных материалов.

**В пятой главе** представлены исследования влияние различных параметров на несущую способность и массу панелей из слоистых композиционных материалов.

Для того чтобы оценить влияние установки стрингеров на массу, с помощью АВРП получены рациональные параметры неподкрепленных и стрингерных панелей. Для примера в таблице 6 представлены массы и факторы потери устойчивости, полученные для панелей с размерами 700×500 мм, нагруженных продольным потоком -686 Н/мм и поперечным потоком -98 Н/мм. Показано, что установка стрингеров позволяет уменьшить массу панели более чем в полтора раза.

Таблица 6 — Сравнение параметров неподкрепленных и стрингерных панелей

| $h, \text{мм}$                                                                                                 | $h_s, \text{мм}$                                     | $n_s$ | $\lambda$ | $m, \text{кг}$ | $h, \text{мм}$                                                                      | $h_s, \text{мм}$ | $n_s$ | $\lambda$ | $m, \text{кг}$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------|-----------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------|-----------|----------------|
| шарнирное опирание                                                                                             |                                                      |       |           |                | защемление                                                                          |                  |       |           |                |
| 5,20                                                                                                           | 36                                                   | 3     | 1,10      | 3,45           | 3,64                                                                                | 24               | 4     | 1,03      | 2,37           |
|                                                                                                                | [(90) <sub>3</sub> /(0) <sub>17</sub> ] <sub>s</sub> |       |           |                | [45/(90) <sub>2</sub> /(0) <sub>11</sub> ] <sub>s</sub>                             |                  |       |           |                |
| 9,88                                                                                                           | —                                                    | —     | 1,01      | 5,39           | 7,8                                                                                 | —                | —     | 1,05      | 4,26           |
| [(±45) <sub>6</sub> /0/(±45) <sub>2</sub> /90/0/±45/0/±45/45/0/-45/0/(90) <sub>4</sub> /0/90/0/0] <sub>s</sub> |                                                      |       |           |                | [(0) <sub>2</sub> /(90) <sub>3</sub> /(0) <sub>5</sub> /90/0/0/90/0/0] <sub>s</sub> |                  |       |           |                |



Для демонстрации влияния процедуры балансировки (для исключения коробления) на толщину и несущую способность панелей в таблице 7 представлены укладки, интенсивность деформаций и факторы потери устойчивости стрингерных панелей длиной 800 мм, шириной 600 мм, с восемью стрингерами высотой 22 мм до проведения процедуры балансировки и после.

Таблица 7 — Укладки стрингерной панели до и после балансировки (защемление)

| $q_x/q_y$ , Н/мм   | $h$ , мм | Укладка                                                  | $\varepsilon_i$ , % | $\lambda$ |
|--------------------|----------|----------------------------------------------------------|---------------------|-----------|
| До балансировки    |          |                                                          |                     |           |
| 490/0              | 2,34     | [45/(0) <sub>8</sub> ] <sub>s</sub>                      | 0,131               | 1,03      |
| 490/196            | 4,42     | [(90) <sub>5</sub> /45/(0) <sub>11</sub> ] <sub>s</sub>  | 0,097               | 1,01      |
| После балансировки |          |                                                          |                     |           |
| 490/0              | 2,60     | [±45/(0) <sub>8</sub> ] <sub>s</sub>                     | 0,133               | 1,09      |
| 490/196            | 4,42     | [(90) <sub>5</sub> /±45/(0) <sub>10</sub> ] <sub>s</sub> | 0,098               | 1,01      |

Использование сбалансированной укладки может привести к увеличению толщины на величину двух монослоев или к снижению критической нагрузки на 1–6 % и уменьшению мембранной жесткости на 1–10 %, однако решение в пользу сбалансированной укладки или увеличения несущей способности остается за конструктором.

При проектировании изделий из слоистых композиционных материалов принято использовать укладки с углами армирования 0°, ±45°, 90°, однако иногда, помимо классического базиса возможных углов ориентации слоев в пакете {±45°;90°;0°}, используют углы армирования ±15°, ±30°, ±60° и ±75°.

В таблице 8 для примера представлены результаты рационального проектирования неподкрепленных панелей для различных базисов. Для расчетов использованы механические характеристики материала ACM102-C130UD (таблица 1).

Таблица 8 — Результаты рационального проектирования неподкрепленных панелей

| Базис                                                           | $h$ , мм | Укладка                                                                          | $\varepsilon_i$ , % | $\lambda$ |
|-----------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------|
| $q_x = -490$ Н/мм, $q_y = -98$ Н/мм, $L = 500$ мм, $B = 100$ мм |          |                                                                                  |                     |           |
| опирание                                                        |          |                                                                                  |                     |           |
| {±15°;90°;0°}                                                   | 3,64     | [(90) <sub>2</sub> /±15/90/±15/15/90/–15/(±15) <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>       | 0,130               | 1,18      |
| {±30°;90°;0°}                                                   | 3,38     | [0/90/30/90/–30/(±30) <sub>2</sub> /0/30/(0) <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>         | 0,151               | 1,00      |
| {±45°;90°;0°}                                                   | 3,12     | [(±45) <sub>2</sub> /45/(90) <sub>2</sub> /(0) <sub>5</sub> ] <sub>s</sub>       | 0,186               | 1,02      |
| {±60°;90°;0°}                                                   | 3,12     | [(±60) <sub>3</sub> /60/(0) <sub>5</sub> ] <sub>s</sub>                          | 0,210               | 1,01      |
| {±75°;90°;0°}                                                   | 3,64     | [(±75) <sub>2</sub> /75/(0) <sub>5</sub> /–75/75/(0) <sub>2</sub> ] <sub>s</sub> | 0,154               | 1,22      |
| защемление                                                      |          |                                                                                  |                     |           |
| {±15°;90°;0°}                                                   | 2,86     | [90/15/90/–15/90/±15/15/(90) <sub>3</sub> ] <sub>s</sub>                         | 0,238               | 1,27      |
| {±30°;90°;0°}                                                   | 2,60     | [30/90/–30/±30/30/(0) <sub>4</sub> ] <sub>s</sub>                                | 0,183               | 1,01      |
| {±45°;90°;0°}                                                   | 2,60     | [±45/90/(0) <sub>7</sub> ] <sub>s</sub>                                          | 0,165               | 1,01      |
| {±60°;90°;0°}                                                   | 2,60     | [(±60) <sub>2</sub> /(0) <sub>6</sub> ] <sub>s</sub>                             | 0,186               | 1,06      |
| {±75°;90°;0°}                                                   | 2,86     | [75/0/–75/±75/(0) <sub>6</sub> ] <sub>s</sub>                                    | 0,161               | 1,27      |



В случае опирания по контуру для панели с размерами  $500 \times 100$  мм наименьшую толщину дает использование базисов  $\{\pm 45^\circ; 90^\circ; 0^\circ\}$  и  $\{\pm 60^\circ; 90^\circ; 0^\circ\}$ . Наибольшую мембранную жесткость обеспечивает базис  $\{\pm 15^\circ; 90^\circ; 0^\circ\}$ , он же дает наибольшую толщину. Наименее жесткая панель получена для базиса  $\{\pm 60^\circ; 90^\circ; 0^\circ\}$ . Минимальная толщина квадратной ( $500 \times 500$  мм) опертой панели получена при использовании базиса  $\{\pm 45^\circ; 90^\circ; 0^\circ\}$ . При этом для этих же базисов получена минимальная жесткость. Укладки панели с размерами  $100 \times 500$  мм содержали только слои  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , следовательно толщина и интенсивность деформаций не зависят от перекрестных слоев базиса.

При защемлении по контуру панели толщина остается постоянной для любого из используемых базисов за исключением панели с размерами  $500 \times 100$  мм. Толщина панели при базисах  $\{\pm 15^\circ; 90^\circ; 0^\circ\}$  и  $\{\pm 75^\circ; 90^\circ; 0^\circ\}$  больше, чем в остальных случаях. Максимальная жесткость получена при использовании базиса  $\{\pm 75^\circ; 90^\circ; 0^\circ\}$  для панелей  $500 \times 100$  мм и  $500 \times 500$  мм. Как и в случае опирания, толщина и жесткость панели  $100 \times 500$  мм не зависят от направления перекрестных слоев.

Применение базисов с углами  $\pm 15^\circ$  и  $\pm 75^\circ$  неэффективно с точки зрения толщины, однако если есть ограничение по мембранной жесткости, использование этих углов может дать увеличение до 70 %.

Также исследовано влияние укладки типа *double-double (DD)*, которая представляет собой набор повторяющихся базовых четырехслойных ламинатов  $[\pm\phi/\pm\psi]$  или  $[\phi/-\psi/-\phi/\psi]$ . Плюсами данной укладки являются однородность мембранных механических свойств пакета и предсказуемое пропорциональное изменение компонент матрицы изгибных жесткостей в зависимости от количества базовых ламинатов, а также упрощение укладки слоев и ремонтпригодность таких панелей путем установки накладки. Исследования показали, что в большинстве случаев толщина панелей с укладкой *DD* превышает толщину панелей с укладками, полученными с помощью АВРП, на 2–10 %. Интенсивность деформаций и факторы потери устойчивости сопоставимы для обоих типов укладок. Максимальные прогибы при короблении для панелей с укладкой *DD* в несколько раз выше. Несмотря на то, что для укладок типа *DD* коробление может быть снижено за счет толщины, негативным фактором несимметричных укладок является деформирование в процессе нагружения т. е. панели с симметричной укладкой начинают деформироваться в окрестности критической нагрузки, а панели с несимметричной укладкой деформируются уже на начальных ступенях нагружения, что в ряде случаев может приводить к преждевременной потере несущей способности.

Проведенное исследование может служить основой для дальнейших научных изысканий в этой области. Полученные результаты и рекомендации могут быть использованы при разработке новых композитных конструкций различного назначения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Разработан численно-аналитический алгоритм выбора рациональных параметров композитных панелей по условиям прочности и устойчивости.
2. Получены аналитические решения для определения критического состояния неподкрепленных и стрингерных панелей из слоистого композита при сочетании

внешних нагрузок. В качестве граничных условий на кромках панелей рассмотрены случаи опирания и защемления по контуру. Для подкрепленных панелей учтено взаимное влияние деформирования обшивки и изгибно-крутильного деформирования стрингеров.

3. Аналитические решения определения критических нагрузок верифицированы методом конечных элементов.

4. Для реализации АВРП разработано программное обеспечение по выбору оптимальной укладки монослоев в слоистых композитных панелях по условиям прочности и устойчивости. В программном обеспечении учитываются наличие стрингеров и технологические ограничения по предотвращению коробления при изготовлении. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

5. Проведено сравнение результатов работы АВРП с данными из российских и зарубежных исследований. Для неподкрепленных панелей получено хорошее соответствие результатам, представленным в источниках. Для стрингерных панелей не удалось провести сравнение с другими источниками, ввиду их отсутствия.

6. Для подтверждения несущей способности панелей, полученных с помощью АВРП, были спроектированы образцы стрингерных панелей для последующих испытаний на устойчивость. Разработана конечно-элементная модель образцов в составе испытательного стенда. Проведены испытания образцов на устойчивость. Получено хорошее соответствие критических нагрузок, определенных в эксперименте и с помощью КЭ анализа.

7. Проведено исследование влияния технологических факторов на толщину готового изделия. Установлено значительное влияние на несущую способность, особенно на устойчивость, отклонений толщины, связанных с допусками при поставке препрегов и усадкой при формовании панелей. Установлено, что итоговая толщина детали при вакуумном формовании в процессе отверждения увеличивается, а при автоклавном уменьшается, что соответственно влияет на устойчивость. Установлено, что влияние компоновки слоев в укладке на толщину при формовании несущественно.

8. На примерах показаны результаты работы АВРП, в частности исследовано влияние типов укладок, параметров стрингеров и разных углов армирования на массу панелей, а также влияние ограничения на сбалансированность укладки на несущую способность панели.

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

Перспективным путем совершенствования АВРП является включение дополнительных параметров оптимизации, таких как переменный шаг и высота стрингеров, а также толщина стрингера, отличная от толщины панели.

Создание АВРП трехслойных панелей и цилиндрических оболочек из слоистых композитов, имеющих широкое применение в конструкциях летательных аппаратов, также является одним из перспективных направлений развития данной работы.

## Список основных научных публикаций по теме диссертации

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Терехова Е. С.** Выбор рационального пакета для композитных панелей крыла / Ю. И. Бадрухин, Е. С. Терехова // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. — 2022. — № 2. — С. 72–76.

2. **Терехова Е. С.** Рациональное проектирование тонкостенных несущих панелей из слоистого композита при комбинированном нагружении / Е. С. Терехова, Ю. И. Бадрухин // Вестник Московского авиационного института. — 2023. — Т. 30, № 4. — С. 130–139.

3. **Терехова Е. С.** Влияние некоторых конструктивно-технологических аспектов проектирования изделий из слоистого композита на их несущую способность / Е. С. Терехова // Инженерный журнал: наука и инновации. 2024. № 10 (154). — С. 1–14. — DOI: 10.18698/2308-6033-2024-10-2393.

4. **Терехова Е. С.** Влияние углов ориентации слоя на толщину несущих панелей из слоистого композита / Ю.И. Бадрухин, Е.С. Терехова // Космические аппараты и технологии. — 2024. — Т. 8, № 4 (50). — С. 233–242.

### Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680522 Российская Федерация. Программное обеспечение по выбору оптимальной укладки монослоев в слоистых композитных панелях по условиям прочности и устойчивости : № 2023669792 : заявл. 28.09.2023 : опубл. 02.10.2023 / Ю. И. Бадрухин, **Е. С. Терехова** ; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Институт имени Н.Е. Жуковского».

### Другие публикации

1. **Терехова Е. С.** К проблеме выбора оптимального пакета композитных панелей крыла : // материалы школы-семинара «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов» (Седова заимка, 9–11 сентября 2021 г.) / Ю. И. Бадрухин, Е. С. Терехова. — Новосибирск: СибНИА, 2021. — С. 5–8.

2. **Терехова Е. С.** О выборе параметров композитных панелей по условию прочности и устойчивости : сборник статей научно-технической конференции «Прочность конструкций летательных аппаратов-2022» (Труды Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н.Е. Жуковского, Москва, 08–12 декабря 2022 г.) / Ю. И. Бадрухин, Е. С. Терехова. — Жуковский : ЦАГИ, 2023. — С. 119–123.

3. **Терехова Е. С.** О формировании пакетов из слоистого композита в несущих тонкостенных конструкциях // Краевые задачи и математическое моделирование : тематический сборник научных статей / под общей редакцией Е. А. Вячкиной

/ Ю. И. Бадрухин, Е. С. Терехова. — Новокузнецк : КГПИ ФГБОУ ВО «КемГУ», 2023. — С. 8–15.

4. **Терехова Е. С.** К проблеме создания рациональных тонкостенных несущих конструкций из слоистых композитов // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 г.): сборник тезисов докладов : в 4 т., / Ю. И. Бадрухин, Е. С. Терехова ; Министерство науки и высшего образования РФ; Российская академия наук; Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. — Том 3. — Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2023. — С. 1016–1018.

5. **Терехова Е. С.** Рациональное проектирование тонкостенных панелей из слоистого композита по условиям прочности и устойчивости // Материалы I всероссийской научно-практической конференции аспирантов «Аэродинамика, динамика полетов, прочность и конструирование летательных аппаратов» (г. Новосибирск, 19 декабря 2023 г.) / Ю. И. Бадрухин, В. А. Беспалов, Е. С. Терехова. — 2023. — С. 24–25.

6. **Терехова Е. С.** Об особенностях проектирования панелей из композиционных материалов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов» (г. Новосибирск, 6–9 сентября 2023 г.) / Ю. И. Бадрухин, Е. С. Терехова. — Новосибирск : — 2023. — С. 10.

7. **Терехова Е. С.** Выбор рациональных параметров тонкостенных панелей из слоистого композита с учетом прочности, устойчивости и особенностей технологии // Материалы IX-х «Чаплыгинских чтений», посвященных 155-летию со дня рождения С.А. Чаплыгина / Ю. И. Бадрухин, В. А. Беспалов, Е. С. Терехова. — 2024. — С. 5–6.

Отпечатано в СибНИА

630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова, д. 21/1

Тел./факс: 8(383)278-70-10

Формат 60 × 84/16, объем 1,16 п.л., тираж 100 экз.

Заказ № 19-25, подписано в печать 13.10.2025 г.