

Е.Р. Федюнина, П.В. Просунцов

Расчетно-теоретическое определение характеристик полимерных композиционных материалов технических средств космического туризма

*Допущено Федеральным учебно-методическим объединением
по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 24.00.00
«Авиационная и ракетно-космическая техника» в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям
подготовки специалистов 24.05.01 «Проектирование, производство
и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов»
и магистров 24.04.01 «Ракетные комплексы и космонавтика»*



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2 0 2 6

УДК 629.782
ББК 39.62
Ф32

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://press.bmstu.ru/catalog/item/8639/>

Факультет «Специальное машиностроение»
Кафедра «Ракетно-космические композитные конструкции»

Рецензент
канд. техн. наук *В.В. Горбатенко*

Федюнина, Е. Р.

Ф32 Расчетно-теоретическое определение характеристик полимерных композиционных материалов технических средств космического туризма : учебное пособие / Е. Р. Федюнина, П. В. Просунцов. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2026. — 114, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-6762-4

Представлены теоретические основы и дано описание практического использования пакетов конечно-элементного анализа для расчетно-теоретического определения физико-механических и теплофизических характеристик композиционных материалов, применяемых в обшивке крыла многоразового космического аппарата туристического класса.

Для студентов, изучающих дисциплины «Математическое моделирование теплонагруженных композитных конструкций», «Многоразовые ракетно-космические системы», «Цифровые модели, вычислительные ресурсы и базы данных». Может быть полезно аспирантам, научным работникам и инженерам в области разработки и изготовления композитных конструкций.

УДК 629.782
ББК 39.62

Учебное издание

Федюнина Екатерина Руслановна
Просунцов Павел Викторович

**Расчетно-теоретическое определение характеристик
полимерных композиционных материалов технических средств
космического туризма**

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.
В оформлении использованы шрифты Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 30.04.2026. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 9,43. Тираж 341 экз. Изд. № 1652-2026.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru <https://press.bmstu.ru>

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

ISBN 978-5-7038-6762-4

Предисловие

В учебном пособии представлены расчетно-теоретические подходы к определению физико-механических и теплофизических характеристик композиционных материалов (КМ) с помощью программных комплексов Digimat, Ansys и Comsol. Оно может быть рекомендовано для студентов, которые обучаются по направлениям подготовки специалистов 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракетно-космических комплексов», магистров 24.04.01 «Ракетные комплексы и космонавтика» и изучают дисциплины «Математическое моделирование теплонагруженных композитных конструкций», «Много-разовые ракетно-космические системы», «Цифровые модели, вычислительные ресурсы и базы данных». Пособие является частью цикла учебных изданий по проектированию теплонагруженных конструкций суборбитальных многоразовых космических аппаратов туристического класса (МКА ТК) из КМ.

Учебное пособие представляет собой логически завершенный раздел курса, для которого приводится набор планируемых результатов обучения, заданных программой дисциплины.

Цель пособия — ознакомить учащихся с расчетными методами определения физико-механических и теплофизических характеристик полимерных КМ.

Задачи пособия — сформировать у студентов практические навыки моделирования физико-механических и теплофизических характеристик КМ с использованием современных программных комплексов.

Планируемые результаты обучения — приобретение компетенций, необходимых для решения задач, связанных с определением характеристик КМ с использованием современных программных комплексов.

Дисциплина «Математическое моделирование теплонагруженных композитных конструкций» включает два модуля, изучаемых в течение одного семестра. Представленный в пособии материал относится к разделам 1.2, C1.2, C1.3, C1.4 модуля 1 «Основы моделирования теплообмена в композитных материалах и конструкциях» указанной дисциплины, в котором рассматриваются методы расчетного определения характеристик КМ, методы осреднения и виды анализа, выполняемые программным комплексом MSC.Digimat.

Цель изучения этой дисциплины — овладеть методами расчетного определения характеристик КМ с помощью программного комплекса MSC.Digimat.

После изучения указанных разделов модуля 1 учащиеся смогут:

- формулировать задачи расчетного определения характеристик КМ с помощью современных прикладных программ;
- анализировать влияние микроуровневых характеристик исходных компонентов КМ на его свойства на макроуровне.

Дисциплина «Многоразовые ракетно-космические системы» включает два модуля, изучаемых в течение одного семестра. Представленный в пособии материал относится к разделам 1.1, С1.3 модуля 1 «Основы проектирования и применения многоразовых космических аппаратов» указанной дисциплины, в котором рассматриваются вопросы разработки перспективных МКА, в том числе аппаратов туристического класса.

Цель изучения этой дисциплины — ознакомить студентов с конструктивными особенностями МКА, а также с характеристиками материалов, применяемых в их конструкциях.

После изучения указанных разделов модуля 1 учащиеся смогут сравнивать характеристики и выбирать рациональные параметры материалов конструкции МКА, в том числе аппаратов туристического класса.

Дисциплина «Цифровые модели, вычислительные ресурсы и базы данных» включает два модуля, изучаемых в течение одного семестра. Представленный в пособии материал относится к разделам 1.1, 1.2, С1.1, С1.2 модуля 1 «Цифровые двойники материалов и численные модели разрушения» указанной дисциплины, в котором рассматриваются вопросы расчетного определения характеристик КМ в современных программных комплексах, а также многомасштабный подход к моделированию характеристик КМ.

Цель изучения этой дисциплины — овладеть методом расчетного определения характеристик КМ с помощью современных программных комплексов.

После изучения перечисленных разделов модуля 1 студенты смогут:

- сравнивать характеристики и выбирать рациональный программный комплекс для моделирования характеристик КМ;
- понимать, как влияют основные параметры материала (его тип, толщина, углы ориентации и др.) на результаты определения его эффективных характеристик.

Для изучения указанных дисциплин необходимо предварительно усвоить такие дисциплины, как «Математический анализ», «Соппротивление материалов», «Материаловедение», «Производство композитных конструкций», «Механика композитных сред», «Термодинамика и теплопередача», «Основы физикохимии и технологии композитов», «Информатика», и знать ответы на следующие вопросы:

- что такое КМ;
- какие типы КМ вы знаете;
- как схема армирования влияет на модули упругости и сдвига КМ;
- какие типы углеродных наполнителей и схемы армирования применяются для деталей и узлов ракетно-космической техники из углеродных КМ;
- что такое теплопроводность материала;
- чем КМ отличаются от металлов;
- как оценить прочность КМ;
- какие существуют критерии прочности КМ;
- как анизотропия КМ влияет на их характеристики;
- какие современные КМ обладают высокой удельной прочностью?

Введение

В последние годы все больше предприятий, частных компаний и научных коллективов в стремлении к получению потенциально высокой прибыли ведут собственные разработки в области многоразовых ракет-носителей, малых космических аппаратов и исследования дальнего космоса. К наиболее перспективным направлениям развития космической деятельности относится туризм, вероятными маршрутами которого могут стать суборбитальные и орбитальные полеты, а также экспедиции к Луне и Марсу. По экономическим причинам наибольший интерес представляют именно суборбитальные маршруты. Сегодня известно более 40 коллективов, вовлеченных в создание транспортных средств для регулярных космических полетов — многоразовых космических аппаратов туристического класса (МКА ТК).

Традиционно для достижения высокой весовой и экономической эффективности МКА ТК элементы его планера выполняются из полимерных КМ. Для проектирования МКА ТК необходимы полные и надежные данные о физико-механических и теплофизических характеристиках КМ. Основным источником этих данных служат экспериментальные исследования, проводимые с образцами материалов. Однако чтобы найти статистически обоснованный спектр характеристик КМ с учетом различных видов укладок и толщин монослоев, требуется значительный объем экспериментальных исследований и, следовательно, большие финансовые, временные и трудовые затраты. Поэтому наряду с экспериментальным подходом активно развиваются теоретические расчетные методы, основанные на методе многомасштабного моделирования.

В данном учебном пособии вопросы расчетно-теоретического определения физико-механических и теплофизических характеристик полимерных КМ рассмотрены на примере материалов, используемых в обшивке крыла перспективного МКА ТК «Одуванчик», разрабатываемого на кафедре «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана с 2008 г. (рис. В1).

Крыло МКА ТК содержит силовой набор, изготовленный из углеродной однонаправленной ленты с углами укладки (0 ; $\pm 45^\circ$ и 90°). Его обшивка представляет собой составную конструкцию, которая включает в себя несущие слои из гибридного полимерного КМ и сотового заполнителя (СЗ) между ними (рис. В2). Несущие слои воспринимают продольные нагрузки и поперечные изгибающие моменты, а СЗ — поперечные нагрузки, возникающие при изгибе сэндвич-панели. Использование СЗ обеспечивает совместную работу и устойчивость несущих слоев. Сотовый заполнитель имеет ячеистую



Рис. В1. Преимущества МКА ТК «Одуванчик»

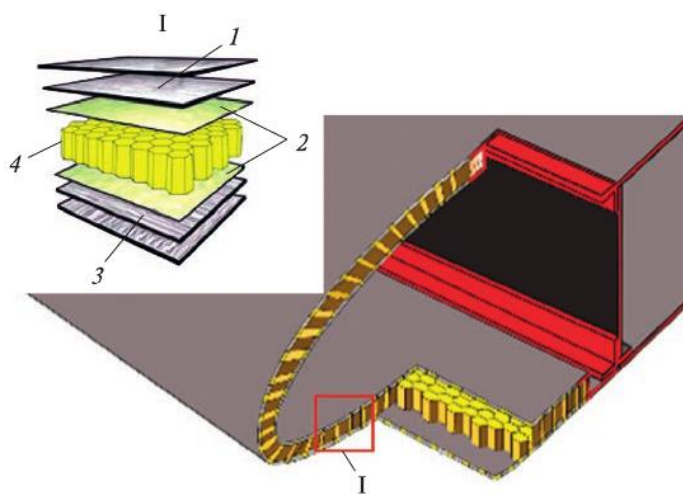


Рис. В2. Элемент обшивки крыла суборбитального МКА ТК:
 1, 3 — внешняя и внутренняя слоистые обшивки из гибридного полимерного КМ соответственно; 2 — адгезив; 4 — сотовый наполнитель

структуру и состоит из множества смежных изолированных каналов, напоминающих пчелиные соты. Выбор материалов для обшивки крыла обусловлен требованиями, предъявляемыми к их характеристикам, такими как высокая прочность и жесткость, низкая стоимость, малая теплопроводность, высокая технологичность. На некоторые участки поверхности крыла, прежде всего на кромку, наносится теплозащитное покрытие, предотвращающее перегрев силовой конструкции при спуске МКА ТК в плотных слоях атмосферы.

Для проектирования крыла, в частности для проведения анализа его напряженно-деформированного и температурного состояния, необходимо определить физико-механические и теплофизические характеристики используемых в обшивке крыла материалов на основе метода многомасштабного моделирования. Выбор этого метода обусловлен тем, что в справочной литературе практически полностью отсутствуют данные о характеристиках КМ, используемых в обшивке крыла, при различных схемах армирования, толщине монослоев и соотношениях между наполнителем и связующим. Применение метода многомасштабного моделирования позволяет существенно сократить трудовые, временные и финансовые ресурсы на этапе эскизного проектирования конструкции МКА ТК.

Оглавление

Предисловие	3
Введение	5
1. Применение композиционных материалов в конструкциях суборбитальных многоразовых космических аппаратов туристического класса	8
Контрольные вопросы и задания	17
2. Расчетно-теоретическое определение характеристик материалов обшивки крыла	18
2.1. Аналитические методы определения характеристик композиционных материалов	18
2.2. Численное моделирование характеристик материалов обшивки крыла	25
2.3. Расчетно-теоретическое определение физико-механических характеристик материалов обшивки крыла	34
2.3.1. Исходные данные для определения физико-механических характеристик монослоев гибридного полимерного композиционного материала	34
2.3.2. Определение физико-механических характеристик монослоя стеклоткани	37
2.3.3. Определение физико-механических характеристик монослоя углепластика на основе однонаправленной ленты	50
2.3.4. Определение физико-механических характеристик сотового заполнителя	56
2.4. Расчетно-теоретическое определение теплопроводности материалов обшивки крыла	62
2.4.1. Исходные данные для определения теплофизических характеристик монослоев гибридного композиционного материала	62
2.4.2. Определение теплофизических характеристик монослоя стеклоткани	63
2.4.3. Определение теплофизических характеристик монослоя углепластика на основе однонаправленной ленты	70
2.4.4. Определение теплопроводности сотового заполнителя в направлении, перпендикулярном плоскости армирования	76
2.4.5. Определение теплопроводности сотового заполнителя в направлении, параллельном плоскости армирования	92
Контрольные вопросы и задания	114
Литература	115