

В.П. Александренков, Д.А. Ягодников

Проектирование теплозащиты камеры РДТТ

Учебно-методическое пособие



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО

МГТУ им. Н.Э. Баумана

2 0 2 6

УДК 621.455
ББК 39.65
А41

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://press.bmstu.ru/catalog/item/8656/>

Факультет «Энергомашиностроение»
Кафедра «Ракетные двигатели»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебно-методического пособия*

*Рецензент
М.А. Тихомиров*

Александренков, В. П.

А41 Проектирование теплозащиты камеры РДТТ : учебно-методическое пособие / В. П. Александренков, Д. А. Ягодников. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2026. — 70, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-6785-3

Рассмотрены этапы и процедуры проектирования системы теплозащиты от формирования исходных данных до заключительного исследования получаемых результатов расчета как доказательства работоспособности и эффективности принимаемого технического решения.

Для студентов старших курсов, обучающихся по специальности «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» специализации «Проектирование ракетных двигателей твердого топлива». Может быть использовано для подготовки аспирантов по данному направлению.

УДК 621.455
ББК 39.65

Учебное издание

Александренков Владислав Петрович, Ягодников Дмитрий Алексеевич
Проектирование теплозащиты камеры РДТТ

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 20.05.2026. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 5,85. Тираж 141 экз. Изд. № 1700-2026.

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.

ISBN 978-5-7038-6785-3

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

Предисловие

Проектирование теплозащиты камеры — неотъемлемая часть проектных работ по созданию современных и перспективных ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ). В практике проектирования и исполнения разнообразных схем РДТТ накоплен богатый опыт решения задачи теплозащиты, представленный в многочисленных работах. Данное пособие служит систематизации этого опыта по исследованию разнообразных и сложных процессов и механизмов взаимодействия материалов конструкции с рабочим телом двигателя, его адаптации к конкретно решаемым проектным задачам по теплозащите для освоения компетенций и приобретения профессиональных навыков проектных работ будущих специалистов.

Целью данного учебно-методического пособия является обучение студентов навыкам выполнения проектных работ по теплозащите конструкции РДТТ путем решения задач установления причинно-следственных связей протекающих физических процессов с техническими решениями проекта, выбора и обоснования используемых материалов теплозащиты конструкции, математического моделирования протекающих процессов и проведения необходимых расчетов для определения термомеханического состояния конструкции, обеспечивающего ее работоспособность.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи.

1. Овладение знаниями причинно-следственных связей внутрибаллистических характеристик и рабочих процессов в камере РДТТ с техническими решениями проекта.

2. Обоснование выбора используемых материалов теплозащиты в зависимости от назначения, конструкции камеры сгорания и сопла, а также используемых материалов корпуса РДТТ.

3. Приобретение знаний и умений, необходимых для математического моделирования протекающих процессов и проведения необходимых расчетов для определения термомеханического состояния конструкции, обеспечивающего ее работоспособность.

Пособие разработано на базе и в обеспечение освоения учебной дисциплины «Теплозащита и прочность конструкций РДТТ», для чего студенты-пользователи должны обладать достаточными знаниями и умениями в решении задач термогазодинамики и тепломассообмена, моделирования и методов расчета тепловых процессов, а также используемых способов теплозащиты конструкции камеры РДТТ и применяемых для этого материалов.

В учебно-методическом пособии теплозащита камеры РДТТ представлена как целостная функциональная система, интегрированная в единый (жизненный) цикл разработки двигателя и при этом обладающая собственными проектными решениями, обусловленными специфическими особенностями протекающих рабочих процессов, методов их моделирования и расчетов, а также спецификой исполнения конструкций и технологии их изготовления.

В результате обучения студенты смогут самостоятельно выполнять разделы курсового и дипломного проектов по теплозащите камеры РДТТ, тесно увязанных с конструкцией камеры и двигателя в целом.

Авторы выражают искреннюю благодарность К.Е. Ковалеву за активное участие в написании данного учебно-методического пособия и А.В. Моисеевой за огромный труд по подготовке рукописи данного учебно-методического пособия к изданию.

Основные сокращения и условные обозначения

ГУ	— граничные условия
КМ	— композиционный материал (композит)
к-фаза	— конденсированная фаза
ПС	— продукты сгорания
ПоС	— пограничный слой
РДТТ	— ракетный двигатель твердого топлива
РТ	— рабочее тело
СП	— стеклопластик
ТеЗ	— теплозащита
ТЗП	— теплозащитное покрытие
ТТ	— твердое топливо
УКМ	— углеродный композитный материал
УП	— углепластик
УУКМ	— углерод-углеродный композитный материал
УУККМ	— углерод-углеродно-керамический композитный материал

c_k	— концентрация k -го компонента, б/р
c_p	— удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К)
D	— диаметр, м
d	— коэффициент массопереноса, кг/(м ² ·с)
F	— проходная площадь сечения, м ²
f	— площадь поверхности, м ²
h	— энтальпия, Дж/кг
i	— номер сечения
K_m	— соотношение компонентов продуктов сгорания, б/р
k_i	— поправочный коэффициент, б/р
$\dot{m}$	— массовый расход, кг/с
p	— давление, Па, МПа
Q	— теплота, Дж
q	— плотность теплового потока, Вт/м ²
R	— газовая постоянная, Дж/(кг·К)
s	— криволинейная координата, м
T	— температура, К
t	— время, с
U	— продольная скорость вдува газа, м/с
u	— скорость в пограничном слое, м/с
V	— поперечная скорость вдува газа
x	— координата, м
α	— коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)
λ	— коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
δ	— толщина, м
ε	— коэффициент излучения, Вт/(м ² ·К ⁴)
μ	— коэффициент динамической вязкости, Па·с

- ρ — плотность, кг/м³
 τ — касательное напряжение, Па
 φ — угол, градус

Числа подобия

$$Le = \frac{\rho d c_p}{\lambda} \text{ — число Льюиса;}$$

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda} \text{ — число Нуссельта;}$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \text{ — число Прандтля;}$$

$$Re = \frac{\rho U \cdot D}{\mu} \text{ — число Рейнольдса;}$$

$$St = \frac{\alpha}{\rho U \cdot c_p} \text{ — число Стантона.}$$

Индексы

- 0 — базовый, он же эталонный
 $г$ — газ
 $кр$ — критический
 $кс$ — кокс
 $л$ — лучистый
 $н$ — начальное
 $п$ — покрытие
 $ср$ — среднее значение
 $усл$ — условный
 e — ядро потока (внешняя граница ПоС)
 f — среднемассовая
 r — параметр восстановления
 s — деструкция (абляция)
 w — стенка

Введение

Теплозащита камер ракетных двигателей — одна из важнейших проблем обеспечения надежной и эффективной работы создаваемых двигателей, обусловленная, с одной стороны, предельно высокими параметрами рабочего процесса преобразования химической энергии топлива в реактивную тягу наряду с ограниченными термомеханическими свойствами традиционно используемых конструкционных материалов. Проблема особенно актуальна при разработке РДТТ ввиду специфики рабочего тела, организации рабочего процесса двигателя и ограниченности возможных способов тепловой защиты по сравнению, например, с жидкостным ракетным двигателем (ЖРД), камеры которого возможно охлаждать компонентами топлива.

Теплозащита (ТеЗ) есть специально принимаемые меры организации (контролируемого) процесса взаимодействия рабочего тела двигателя с конструкцией, обеспечивающего требуемый температурный режим ее надежной работы. В конечном счете это конкретные конструкторские и технические решения, принять которые необходимо для изготовления камеры и обеспечения работоспособности двигателя. При этом очевидно, что используемые способы и механизмы ТеЗ сопряжены с определенными и неизбежными потерями: снижением удельных энергетических и ухудшением массогабаритных показателей двигателя, что накладывает определенные ограничения на систему ТеЗ и обостряет проблему, а также отражается на эффективности проектируемого двигателя. Решение проблемы эффективности ТеЗ РДТТ достигается научно обоснованной проектной работой, максимально удовлетворяющей (по возможности) поставленные общепроектные требования.

Исходя из общепроектных задач разработки и создания двигателя, к системе ТеЗ предъявляется ряд требований, таких как минимизация потерь удельного импульса, улучшение массогабаритных характеристик, повышение надежности и ряд других, удовлетворить которым одновременно чрезвычайно сложно.

Проектирование ТеЗ — составная, неотъемлемая часть проектирования камеры и двигателя в целом — основывается на общепроектных директивных данных. В то же время ввиду специфики протекающих процессов тепломассопереноса при взаимодействии элементов конструкции камеры с рабочим телом она обладает определенной самостоятельностью в выборе вариантов исполнения технического решения как при выборе механизмов теплозащиты, так и при выборе теплозащитных материалов. Это дает основание выделять ТеЗ в отдельную задачу проекта. Специфические особенности ТеЗ отражаются и регламентируются постановкой задачи проектирования, обеспечивающей последовательность исполнения конечного решения.

Методика проектирования строится на последовательном выполнении ряда необходимых процедур, приводящих к конкретному техническому решению по отдельным частям и зонам камеры:

- идентификация объекта тепловой защиты;

Оглавление

Предисловие	3
Основные сокращения и условные обозначения	5
Введение	7
1. Постановка задачи и методика проектирования теплозащиты камеры РДТТ	9
1.1. Основные положения	9
1.2. Идентификация объекта теплозащиты	10
1.3. Анализ процессов тепломассообмена и выбор способов теплозащиты ...	14
1.4. Выбор материальной базы проекта теплозащиты	17
Контрольные вопросы	22
2. Математическое обеспечение проектных работ теплозащиты	23
2.1. Математическое моделирование конвективного теплообмена	23
2.2. Моделирование радиационного теплообмена	33
2.3. Моделирование температурного состояния конструкции	37
2.4. Моделирование процессов деструкции материалов	42
Контрольные вопросы	46
3. Методика и порядок расчетов теплозащиты	48
3.1. Постановка задачи	48
3.2. Расчет теплозащиты корпуса двигателя	48
3.3. Расчет теплозащиты сопловых блоков	51
Контрольные вопросы	57
4. Пример расчета распределения характеристик тепломассообмена по тракту сопла Лавала	58
4.1. Идентификация объекта расчета	58
4.2. Термогазодинамический расчет течения продуктов сгорания	61
4.3. Вычисление распределения коэффициента конвективной теплоотдачи по длине проточной части сопла	64
4.4. Расчет удельных тепловых потоков	66
4.5. Вычисление коэффициента массопереноса по длине сопла	67
4.6. Анализ результатов расчета. Выводы	70
Литература	71