

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 539.4

DOI: 10.52190/2073-2562_2024_1_3

EDN: XKFGOW

Метод подтверждения прочности композитных конструкций к совместному тепловому и механическому действию потоков излучений и частиц

^{1,2} А. В. ОСТРИК, д-р техн. наук; ¹ Д. Н. НИКОЛАЕВ, канд. физ.-мат. наук;

² И. В. БУГАЙ, канд. техн. наук

¹ Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка, Московская обл., Россия

² Технологический университет им. А. А. Леонова, г. Королев, Московская обл., Россия

Предложен расчетно-экспериментальный метод подтверждения прочности композитных конструкций ракетно-космической техники к совместному тепловому и механическому действию излучений и частиц различной физической природы. Суть метода заключается в определении параметров нестационарных тепловых и механических нагрузок расчетным путем и воспроизведении этих параметров специальными наборами устройств при проведении прочностных испытаний натуральных конструкций. Рассмотрены наборы этих устройств и испытательный стенд, их использующий совместно с моделированием теплосиловых полетных нагрузок. Показано, что имеются комплекс расчетных методик и необходимый набор устройств, воспроизводящих тепловое и механическое действия излучений, а также испытательный стенд, обеспечивающий их совместное функционирование.

Ключевые слова: совместное тепловое и механическое действие потоков излучений и частиц, полетные теплосиловые нагрузки, численное моделирование, газодинамические устройства, пиротехнические составы, теплопрочностные испытания композитных конструкций.

Выполнение современных требований к ракетно-космической технике (РКТ) немислимо без обеспечения защиты их конструкций от потоков излучений и частиц (ПИЧ) различной физической природы [1–3]. Однако достаточно мощные лабораторные источники ПИЧ, позволяющие проводить испытания с непосредственным облучением натуральных элементов конструкций РКТ и моделированием условий их функционирования в полете отсутствуют. Поэтому, авторы предлагают использовать расчетно-экспериментальный метод, при котором параметры теплового и механического действий ПИЧ прогнозируются расчетным путем, а прочность к нестационарным теплосиловым нагрузкам с рассчитанными параметрами подтверждается в натуральных испытаниях элементов

конструкций РКТ с использованием воспроизводящих устройств.

В данной работе основное внимание уделено тепловому и механическому действиям ионизирующих излучений (ИИ). Отметим также, что изложение всего научно-методического аппарата в рамках одной работы не представляется возможным. Детальное рассмотрение затрагиваемых вопросов имеется в работах [1–4].

Структура расчетно-экспериментального метода

Структура предлагаемого расчетно-экспериментального метода представлена на рис. 1.

Первые три этапа (I–III) проводят чисто расчетным путем, а четвертый — на основе экспериментального подхода.

Этап I предназначен для расчетного определения параметров ПИЧ у поверхности конструкции по характеристикам источника и его удаленности от объекта РКТ, а также от высот расположения в атмосфере источника и объекта РКТ. В зависимости от длины волны (энергии квантов) применяются различные модели распространения излучения и соответствующие расчетные методики (см. рис. 1).

Острик Афанасий Викторович, профессор, главный научный сотрудник.

E-mail: ostrik@fcr.ac.ru

Николаев Дмитрий Николаевич, начальник лаборатории.

E-mail: nik@fcr.ac.ru

Бугай Ирина Владимировна, заведующая кафедрой математики и естественнонаучных дисциплин.

E-mail: ibug@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23 декабря 2023 г.

© Острик А. В., Николаев Д. Н., Бугай И. В., 2024

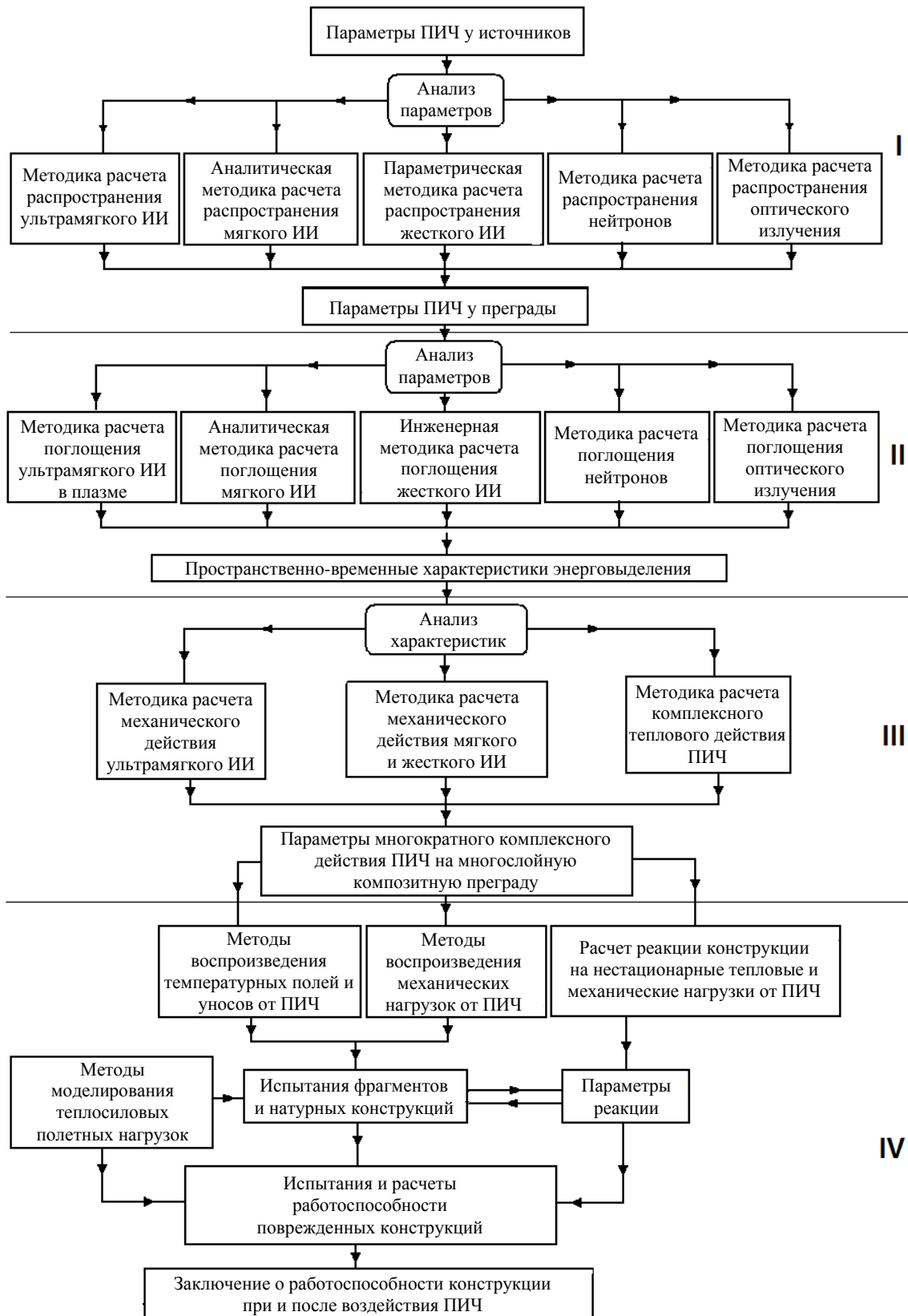


Рис. 1. Структура расчетно-экспериментального метода

Во многих случаях в оптическом диапазоне, достаточно учесть расходимость излучения и его поглощение с учетом зависимости коэффициента поглощения от длины волны. В случае ультрамягкого и мягкого ИИ рассеянием можно пренебречь

и учитывать только процесс фотопоглощения, что позволяет применить аналитический подход (расчет сводится к численному интегрированию). При высоких плотностях энергии ультрамягкого ионизирующего излучения (УМИИ) важным так-

же оказывается эффект просветления воздушной среды под действием распространяющегося импульса излучения [5].

Для распространения жесткого ИИ существенными оказываются процессы рассеяния, и расчет в неоднородной атмосфере целесообразно проводить методом Монте-Карло [3]. Также может быть использован параметрический подход [6], при котором база данных результатов расчетов методом Монте-Карло первоначально моноэнергетических потоков ИИ применяется для прогнозирования характеристик распространения ИИ произвольного спектра. Такой подход оказывается полезным при решении многопараметрических оптимизационных задач.

В некоторых случаях параметры ПИЧ уже известны у поверхности конструкции (например, заданы в тактико-технических требованиях) и тогда необходимость выполнения этапа I отпадает.

В этапе II требуется определить пространственно-временной профиль энерговыделения в облучаемой конструкции по заданным параметрам ПИЧ у её поверхности. Возможна постановка единой задачи о распространении и поглощении мягкого и/или жесткого ИИ в атмосфере и конструкции. Тогда этап II для этих видов излучений просто бы потерял смысл. Однако такая постановка нецелесообразна, поскольку взаимовлияние процессов переноса в атмосфере и преграде существенно, а постановки задач в этих средах различны по масштабам, геометрии и физике. В частности, в атмосфере не требуется учет переноса флуоресцентных квантов, но в общем случае важна многомерность геометрии задачи.

Оптическое излучение поглощается в тонком приповерхностном слое толщиной порядка длины волны. Профиль энерговыделения в этом слое для задач расчета параметров теплового и механического действий не требуется, поскольку хорошим приближением является модель поверхностного поглощения, в рамках которой достаточно информации об определяемой экспериментально зависимости коэффициента отражения от длины волны и температуры поверхности. Это справедливо, пока аблирующий (испаряющийся или сублимирующий) материал не начнет поглощать и экранировать конденсированную часть преграды от падающего излучения. Однако применительно к воздействию излучения оптического диапазона на объекты РКТ режим с экранировкой не реализуется.

Напротив, при воздействии УМИИ вблизи поверхности образуется низкотемпературная плазма, интенсивно поглощающая излучение. Механическое действие ИИ в режиме плазмообразования определяется профилем энерговыделения в этой

плазме и зависит от её зарядового состава, который меняется в процессе расширения плазменной части преграды [7].

Этап III завершает расчетную часть расчетно-экспериментального метода. Его целью является нахождение параметров теплового и механического действий ПИЧ, которые рассчитывают по определенным на этапе II пространственно-временным профилям энерговыделения (в случае воздействия УМИИ задача не разделяется, и нестационарное энерговыделение считается в едином расчетном коде совместно с численным моделированием газодинамических процессов, формирующих механическое действие [7]).

В отличие от воздействия ультрамягкого или мягкого ИИ, когда формируется только сублимационный (испарительный) импульс, при воздействии жесткого ИИ часть импульса передается конденсированному материалу в результате внешнего откола в облучаемой преграде. В этом случае требуется считать нестационарные процессы как в газообразной, так и в конденсированной частях преграды с учетом её откольных разрушений [3].

В итоге, расчетным путем определяют параметры механического действия: толщину лицевых и тыльных отколов; длительность и величина импульса давления, формирующегося на оставшейся конденсированной части преграды.

Расчет теплового действия сводится к решению задачи перераспределения энергии в многослойной композитной преграде посредством теплопроводности и конвективного переноса энергии образующимися в результате нагрева газами при внешнем поверхностном и объемном энерговыделениях от излучения [8]. Во многих случаях при расчетах необходим учет физико-химических превращений [8, 9].

Для воздействия оптического излучения на элементы РКТ характерны режимы теплопроводности (интенсивность воздействия мала, уноса материала не наблюдается и имеет место только его нагрев посредством передачи тепла от облучаемой поверхности теплопроводностью) и развитого испарения.

Как уже отмечалось, в случае воздействия УМИИ конденсированная часть преграды экранируется образующейся плазмой, и эффекты теплового действия (унос и нагрев) незначительны. Действие мягкого ИИ приводит к уносу материала с поверхности, а в случае жесткого ИИ добавляется еще и объемный нагрев.

Следует отметить, что для теплового действия ПИЧ характерна его комплексность [3]: тепло накапливается в конструкции от воздействия к воздействию и, вследствие зависимости теплофизических свойств материалов от температуры, а

также возможного изменения толщины облучаемых слоев при воздействии, оказывается несправедливым принцип суперпозиции.

В итоге, расчетным путем определяют параметры теплового действия ПИЧ: толщину унесенного с облучаемой поверхности материала и нестационарный температурный профиль в конструкции.

Этап IV является принципиально экспериментальным. Это обусловлено тем очевидным фактом, что расчетный аппарат механики сплошной среды пока еще не дает надежных результатов по прогнозированию динамической прочности многослойных композитных конструкций и может быть использован наряду с натурными испытаниями для установки пределов измерения датчиков реакции (например, деформаций и прогибов), а также для дополнительного контроля экспериментальных данных в целях исключения грубой экспериментальной ошибки. Описанное взаимное использование экспериментальных и расчетных данных показано двумя разнонаправленными стрелочками (см. рис. 1).

Унос и откольные разрушения моделируют при испытаниях уменьшением толщины снаружи (лицевой откол и тепловой унос) и изнутри (тыльный откол) конструкции. Кроме того, для проведения этапа IV требуются:

- наборы устройств воспроизведения температурных профилей в конструкции от теплового действия ПИЧ;
- наборы устройств воспроизведения нестационарных нагрузок, формирующихся на поверхности конструкции при механическом действии ПИЧ;
- устройства моделирования полетных тепловых нагрузок;

- испытательный стенд, который бы обеспечивал совместное использование всех устройств моделирования и средств измерения реакции испытываемой конструкции на совместное действие тепловых и механических нестационарных нагрузок.

Устройства воспроизведения температурного профиля

При воспроизведении температурного профиля в элементах композитных конструкций РКТ возможно применение нескольких способов подвода тепла к преграде: с помощью контактной токопроводящей пластины, листовых пиротехнических зарядов, КВЧ-излучения (излучения крайне высокой частоты с длиной волны 1—10 мм) и др.

На рис. 2 представлены схемы испытаний плоских пакетов композитных материалов на совместное тепловое и механическое действие ИИ при использовании электронагрева однослойной композитной преграды (рис. 2, а) и комбинированного нагрева двухслойной композитной преграды токопроводящим слоем и КВЧ-излучением (рис. 2, б). Измеренные (использовал бесконтактный способ измерения температуры [10]) температурные профили для этих двух случаев показаны на рис. 3, а и 3, б, соответственно рис. 2, а 2, б.

Воспроизводимые (определенные методом Монте-Карло распределения удельного энерговыделения от ИИ для этих преград и пересчитанные на распределения температуры) профили показаны на рис. 3 пунктирными линиями. Видно, что подбором интенсивности ввода энергии в композитные пластины удастся достичь удовлетворительного согласия в требуемых и получаемых температурных профилях.

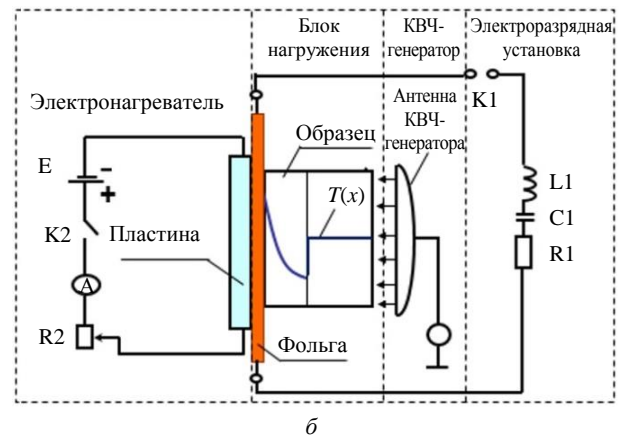
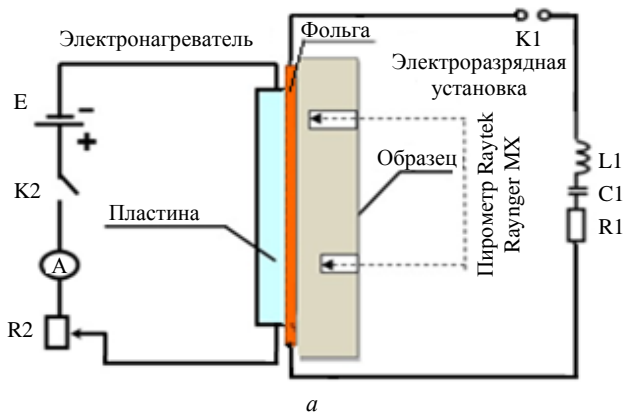


Рис. 2. Схема испытаний плоских пакетов композитных материалов:

а — электронагрев однослойной преграды; б — комбинированный нагрев (электронагрев + КВЧ) двухслойной преграды

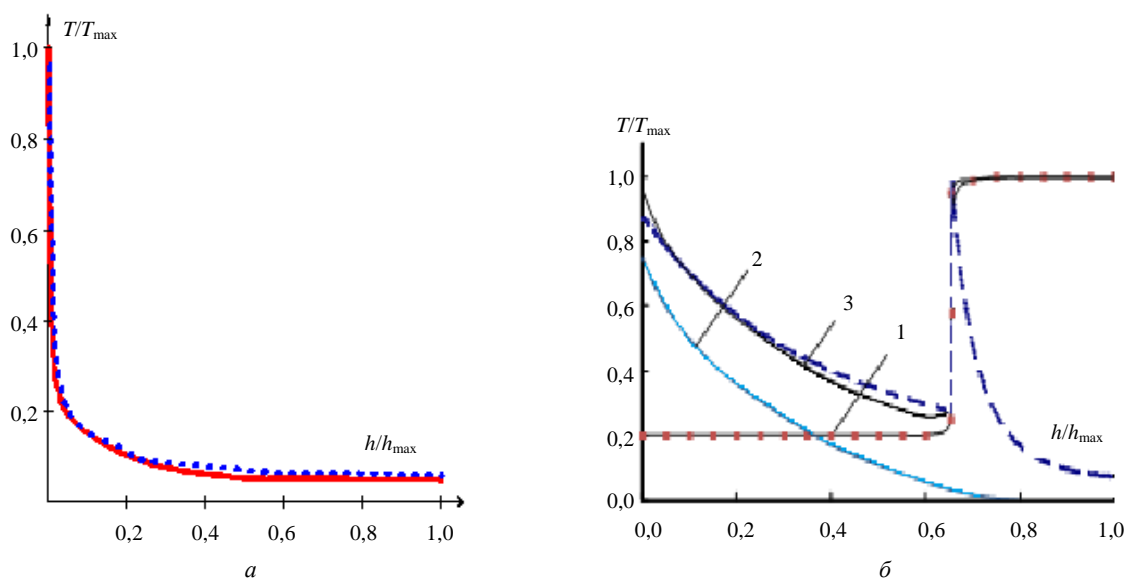


Рис. 3. Температурные профили:

a — электронагрев однослойной преграды (пунктиром — воспроизводимый T-профиль от ИИ);
б — комбинированный нагрев (1 — КВЧ-нагрев; 2 — электронагрев; 3 — суммарный;
 пунктир — воспроизводимый T-профиль от ИИ)

По достижению в образце необходимого распределения температуры его нагружают импульсом давления, формирующимся при разряде батареи конденсаторов электроразрядной установки через металлическую фольгу (она показана для обоих вариантов преграды на рис. 2). Параметры импульса давления (величина и длительность) соответствуют механическому действию ИИ.

Рассмотренные методы нагрева используют для экспериментов с фрагментами конструкций. Применительно к испытаниям натуральных элементов РКТ более удобным оказывается применение пиротехнических составов (ПТС). Использование гибких листов ПТС позволяет изготавливать контактные пиротехнические устройства (КПТУ), пригодные для нагрева конструкций с криволинейными поверхностями. Заданный поток энергии на поверхности испытываемого объекта и ее температуру воспроизводят подбором рецептуры и толщины листа. Рецептура определяет скорость горения, а толщина листа — общее время подвода тепла. Многослойные КПТУ, состоящие из слоев с различными скоростями горения позволяют варьировать её в диапазоне от единиц до сотен мм/с. Важным варьируемым показателем также является удельное тепловыделение ПТС, меняющееся в широких пределах (50—1000 кал/г).

Экспериментальные исследования показали, что, используя различные многослойные КПТУ, возможно обеспечить для композитного материала: времена нагрева 1—10 с; температуры вблизи нагреваемой поверхности 100—3000 °С; темпы нагрева 10—3000 град/с. Отметим, что для создания температурных полей при большой площади

поверхности натурной конструкции необходимо использовать многоточечное инициирование.

Устройства воспроизведения нестационарных нагрузок

При испытаниях на прочность композитных конструкций используют представительный набор устройств [1, 2, 11], позволяющих воспроизводить нестационарные нагрузки, соответствующие механическому действию потоков излучений в широком диапазоне изменения длин волн, плотностей энергий и длительности облучения.

Ряд из этих устройств разрабатывали [11] специально для воспроизведения механического действия оптического излучения и генерирования нагрузки с весьма сложными пространственно-временными распределениями давления по поверхности конструкции.

Тем не менее, как отмечалось в [1], требуются новые устройства, позволяющие воспроизводить малоимпульсные нагрузки микросекундной длительности с высокой одновременностью приложения давления к поверхности испытываемого элемента РКТ. Поэтому дополнительно к набору устройств [1, 2, 11] разработаны два новых малоимпульсных устройства: ленточный заряд [12] и заряд с управляемым инициированием [13].

Ленточный заряд выполняют из лент взрывчатого вещества (ВВ), которые размещают на трубках круглого сечения. Трубки равноудалены от поверхности нагружаемого объекта. Для обеспечения одновременности приложения нагрузки ис-

пользуется многоточечная лучевая система иницирования с торцов лент ВВ (рис. 4).



Рис. 4. Ленточный заряд взрывчатого вещества

Заряд с управляемым иницированием изготавливают в виде тонкой (≤ 3 мм) оболочки из волнокнистого материала с фрезерованными каналами, заполненными пластическим ВВ (рис. 5). Размещение в каналах даёт ряд преимуществ по сравнению с другими способами локализации ВВ (например, сплошным слоем или секторами на пористой подложке). Управляемое иницирование реализуется методом, заимствованным из технологии создания давлений мегабарного уровня [14].

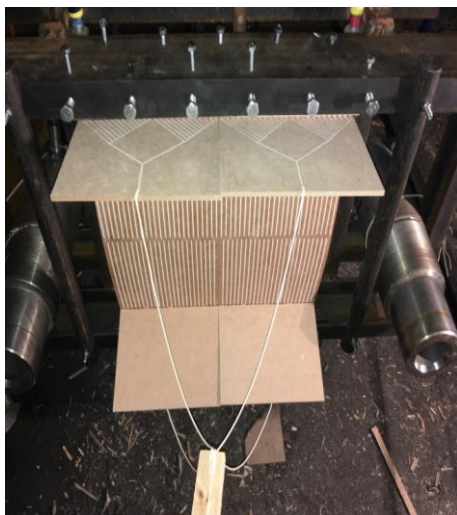


Рис. 5. Заряд взрывчатого вещества с управляемым иницированием

Набор устройств [1, 2, 11], дополненный этими новыми разработками, имеет более широкие возможности и используется в настоящее время для испытаний композитных конструкций РКТ на прочность к механическому действию ПИЧ различной физической природы.

Универсальный испытательный стенд

Устройства, воспроизводящие действия ПИЧ (в том числе, и комплексное тепловое и механическое действие), располагают для совместного функционирования на универсальном испытательном стенде [15]. Назначение стенда — обеспечить заданную последовательность воздействий устройствами на испытываемую конструкцию и по возможности воспроизвести полетные теплосиловые условия (в рассматриваемом варианте стенда это тепловой нагрев от аэродинамических потоков и внутреннее давление в замкнутой оболочечной конструкции).

Под универсальностью стенда понимается:

- двойное предназначение (для верификации отдельных воспроизводящих устройств и для проведения испытаний);
- многофункциональность (применим для различных сочетаний воздействий);
- широкая область использования (помимо действий ПИЧ может быть использован для любых нестационарных воздействий теплосиловых нагрузок, имеющих сложный пространственно-временной профиль).

Универсальность достигается использованием основы стенда в комплекте с различным набором воспроизводящих устройств.

Возможный вариант снаряжения универсального испытательного стенда показан на рис. 6 (рис. 6, а — вид сбоку; рис. 6, б — фронтальный вид).

Испытываемая тонкостенная композитная конструкция (3) подвешивается на баллистическом маятнике (1, 2). Она герметично закрывается двумя прочными стальными крышками. С одной стороны конструкция нагревается сгорающим ПТС (5), ее температура измеряется промышленным оптическим пирометром (11) и непрерывно записывается в память компьютера. Одновременно сгорает жгут из ПТС, подвешенный внутри конструкции, создавая внутреннее давление (величину внутреннего давления измеряют пьезодатчиком, а также рассчитывают по результатам изменений тензодатчиков). В момент догорания ПТС (5) открывается стопор (6), и пружинный поворотный механизм поворачивает конструкцию на 180° в положение, для которого нагретая часть оказывается напротив взрывного нагружающего устройства (4), установленного неподвижно. Как только новое положение конструкции фиксируется стопором (8), происходит подрыв устройства (4). Для диагностики состояния нагружаемой конструкции измеряются окружные и продольные нестационарные деформации в различных точках внутренней поверхности оболочки при помощи тензодатчиков (10). Электрические выводы тензодатчиков подключены при помощи герметичной колодки (9), её же используют для вывода контактов электроподжига ПТС внутри.

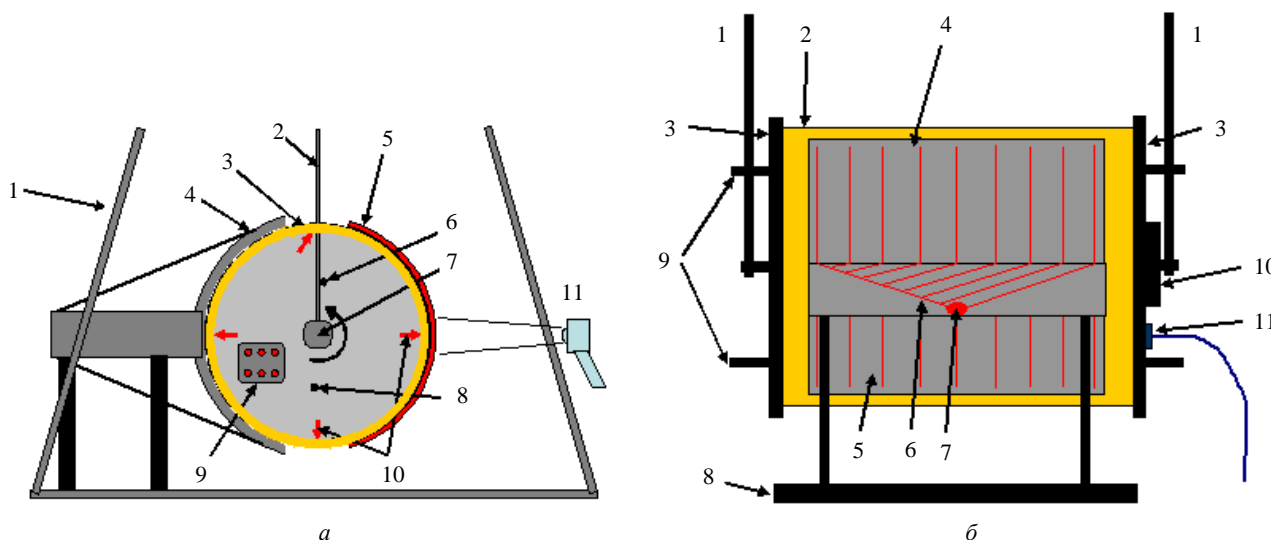


Рис. 6. Схема стенда:

а — вид сбоку: 1 — стойка маятника (верхний шарнир не показан); 2 — подвес маятника; 3 — испытываемая цилиндрическая оболочка с крышками; 4 — взрывное устройство ЗУИ или ЭПЗ-стойка; 5 — пиротехнический состав или ТЭН; 6 — съемный стопор; 7 — пружинный поворотный механизм; 8 — несъемный стопор; 9 — герметичная электрическая колодка; 10 — места расположения тензодатчиков; 11 — оптический пирометр.

б — вид с фронта: 1 — подвес маятника; 2 — испытываемая цилиндрическая оболочка; 3 — герметичные крышки; 4 — взрывное устройство распределенного импульсного нагружения, верхняя деталь; 5 — взрывное устройство, нижняя деталь; 6 — детонационная разводка; 7 — точка инициирования; 8 — стойка взрывного устройства нагружения; 9 — стопоры; 10 — пружинный поворотный механизм; 11 — герметичная электрическая колодка

При конструировании универсального стенда учтены предыдущие наработки. В частности, за основу стенда был принят ранее разработанный стендовый ракетный двигатель с телом вращения [1]. Однако в стенд внесено принципиальное изменение, расширившее возможности его универсализации. Ранее [1] воспроизводящие устройства перемещались над испытываемой конструкцией при их замене. В новом варианте, испытываемая конструкция проворачивается при смене нагревательного устройства для воспроизведения теплового действия ПИЧ и полетных тепловых потоков на взрывное устройство для моделирования механического действия ПИЧ. Необходимость поворота оболочки на 180° вызвана тем, что в противном случае при сгорании слоя ПТС (5, рис. 6, *а*) может быть повреждено взрывное устройство (4, рис. 6, *а*).

Выводы

Предложен расчетно-экспериментальный метод подтверждения прочности композитных конструкций РКТ к комплексному тепловому и механическому действию ПИЧ. Представлена структура этого метода, рассмотрены его основные этапы и необходимые расчетные модели.

Для воспроизведения теплового действия ПИЧ на натурные конструкции РКТ предложено

использовать многослойные контактные пиротехнические устройства с многоточечным инициированием. Экспериментально определены возможности таких устройств: времена нагрева 1—10 с; температуры вблизи нагреваемой поверхности 100—3000 °С; темпы нагрева 10—3000 град/с.

Рассмотрены два новых малоимпульсных устройства микросекундной длительности для воспроизведения нестационарных нагрузок, соответствующих механическому действию ИИ.

Разработан универсальный испытательный стенд, обеспечивающий совместное функционирование рассматриваемых устройств и заданную последовательность их воздействий на испытываемую конструкцию.

Таким образом, для реализации предложенного расчетно-экспериментального метода имеется комплекс расчетных методик и разработан необходимый набор устройств, воспроизводящих тепловое и механическое действия излучений, а также испытательный стенд, обеспечивающий их совместное функционирование.

Работа выполнена в рамках Госзадания (регистрационный номер 124020600049-8), а также при финансовой поддержке РФФ (соглашение № 21-72-20023)

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакулин В. Н., Острик А. В., Чепрунов А. А. и др. Механическое действие рентгеновского излучения на тонкостенные композиционные конструкции. — М.: Физматлит, 2008. — 256 с.
2. Осоловский В. С., Острик А. В., Чепрунов А. А. и др. Воспроизведение механического и теплового действия рентгеновского излучения на элементы конструкций объектов // Монография. Физика ядерного взрыва: В 5 т. Т. 3. Воспроизведение факторов взрыва. — М.: Физматлит, 2013. С. 350—386.
3. Бакулин В. Н., Острик А. В. Комплексное действие излучений и частиц на тонкостенные конструкции с гетерогенными покрытиями. — М.: Физматлит, 2015. — 288 с.
4. Грибанов В. М., Острик А. В., Потапенко А. И., Фортов В. Е. Механическое действие рентгеновского излучения на гетерогенные материалы и тонкостенные конструкции // Монография. Физика ядерного взрыва: В 5 т. Том 2. Действие взрыва. — М.: Физматлит, 2010. С. 344—447.
5. Волков И. А., Острик А. В., Рыбаков С. В. Численный метод расчета параметров высокоинтенсивного импульса мягкого рентгеновского излучения при прохождении в неоднородной разреженной атмосфере // Математическое моделирование. 1995. Т. 7. № 1. С. 22—34.
6. Грибанов В. М., Носенко В. П., Острик А. В. Параметрическая методика расчета энерговыделения при воздействии рентгеновского излучения на композитные преграды // Конструкции из композиционных материалов. 2003. Вып. 1. С. 39—47.
7. Острик А. В., Петровский В. П., Рыбаков С. В. Воздействие мощных импульсов мягкого рентгеновского излучения на конденсированные среды // Конструкции из композиционных материалов. 1997. Вып. 3, 4. С. 33—41.
8. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. — М.: Энергия, 1976. — 391 с.
9. Острик А. В. Метод расчета нестационарного деформирования предварительно напряженных композитных многослойных оболочек переменной толщины при импульсном энерговыделении // Конструкции из композиционных материалов. 2016. Вып. 3. С. 3—10.
10. Гирин Ю. В., Слободчиков С. С., Чепрунов А. А. и др. Способ измерения профиля температуры в конструкционных материалах. Патент РФ № 2521217. Заявл. 26.12.2012. Оpubл. 27.06.2014.
11. Лоборев В. М., Острик А. В., Петровский В. П., Чепрунов А. А. Методы моделирования механического действия излучений на материалы и конструкции. Научно-технический сборник № 1. — Сергиев Посад. ЦФТИ МО РФ, 1997. — 75 с.
12. Гирин Ю. В., Мартынов А. Г., Чепрунов А. А., Первов А. Ю. Ленточный заряд из листового взрывчатого вещества. Патент РФ № 2557298. Заявл. 26.12.2013. Оpubл. 24.06.2015.
13. Ostrik A. V., Nikolaev D. N., Bugay I. V. New gasdynamic device for modeling of mechanical action of radiation // Book of Abstracts of XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, 1—6 March, 2019, Elbrus, Moscow, 2019.
14. Николаев Д. Н., Острик А. В., Терновой В. Я., Шуттов А. В. Устройство для квазистационарного гиперзвукового ударного сжатия малоплотных сред, основанное на эффекте усиления кумуляции ударных волн при цилиндрическом сжатии в среде с уменьшающейся плотностью. Патент РФ № 2680506. Заявл. 01.09.2017. Оpubл. 21.02.2019.
15. Кузьменков А. Ю., Острик А. В., Чепрунов А. А. Стенд для испытаний конструкций летательных аппаратов на совместное действие тепловых и механических нагрузок. Патент РФ № 2789669. Заявл. 05.12.2022. Оpubл. 07.02.2023.

Method of justification of strength of composite constructions to joint thermal and mechanical action of radiation and particle flows

^{1,2} A. V. OSTRICK, ¹ D. N. NIKOLAEV, ² I. V. BUGAY

¹ Federal research center of problems of chemical physics and medical RAS, Chernogolovka, Moscow region, Russia

² Leonov Technological University, Korolev, Moscow Region, Russia

Calculation and experimental method of justification of strength of composite constructions of rocket and space technology to joint thermal and mechanical action of radiations and particles of different physical nature is proposed. The essence of the method is to determine the parameters of non-stationary thermal and mechanical loads by calculation and reproduction of these parameters by special sets of devices during strength tests of full-scale constructions. Sets of these devices and test bench using them together with modeling of heat-power flight loads are considered. It is shown that there are a set of calculation methods and the necessary set of devices that reproduce the thermal and mechanical actions of radiation and particle flows, as well as a test bench that provides their joint functioning.

Keywords: joint thermal and mechanical action of radiation and particle flows, flight heat-power loads, numerical modeling, gas-dynamic devices, pyrotechnic compositions, heat-strength tests of composite constructions.