

КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИХ СИСТЕМ

УДК 629.7.018.4

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ МНОГОРАЗОВЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Афанасьев В.А.* , Тушавина О.В.**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

** e-mail: vafanasiev@mai.ru*

*** e-mail: solgtu@gmail.com*

Предложена методика стендовых климатических испытаний теплозащитных материалов (ТЗМ) многоразового использования. Рассмотрены испытания воздействия положительных и отрицательных температур. Приведены методики испытаний ТЗМ на влагуустойчивость и воздействие атмосферных осадков. Даны рекомендации для проведения испытаний ТЗМ на сезонную и суточную цикличность. Представлены разработанные и созданные экспериментальные средства, позволяющие проводить климатические испытания теплозащитных материалов многоразового использования.

Ключевые слова: теплозащитный материал многоразового использования, методика климатических испытаний, экспериментальные средства для многофакторных испытаний.

Известно, что на тепловую защиту многоразовой космической системы (МКС), начиная с момента предстартовой подготовки и до момента завершения лётной программы — посадки, действует около двадцати внешних факторов [1—4, 10, 11]. К ним относятся: интенсивный аэродинамический нагрев при разном химическом составе атмосферы, высокие и низкие температуры, резкие перепады атмосферного давления, механические нагрузки, вызванные газодинамикой сверхзвуковых течений, инерционные и ударные нагрузки, влажность атмосферы, дождь, снег, пылевая и дождевая облач-

ность, акустические нагрузки, глубокий космический вакуум, космическое излучение, солнечная радиация и др.

Каждый этап эксплуатации космического летательного аппарата (КЛА) характеризуется своими определяющими параметрами внешних воздействий.

Одним из важнейших факторов, от которых зависит надёжность работы тепловой защиты МКС, являются условия хранения МКС в течение года и в предстартовый период. Это так называемый климатический фактор воздействия на тепловую защи-

ту на этапе транспортировки, хранения и предстартовой подготовки. В зависимости от района эксплуатации отдельные климатические факторы будут иметь различные количественные значения. Так, например, влажность воздуха в разное время года может изменяться в пределах от 60 до 98%, перепад температуры окружающей среды может составлять от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$.

Воздействие внешних факторов на этапе транспортировки и хранения КЛА вызывает так называемое старение материалов тепловой защиты. При реализации этого вредного процесса на поверхности ТЗМ появляются микротрещины, в объеме материалов происходят локальные химические реакции с разрывом межмолекулярных связей, химическое реагирование с внешней средой и др. Все это является причиной изменения прочностных и других свойств материалов, входящих в состав тепловой защиты.

Этап подготовки МКС к пуску на стартовом столе может занимать при благоприятных условиях около двух недель. На этом этапе теплозащитное покрытие находится под прямым воздействием всех климатических факторов, таких, как влажность и температура воздуха, атмосферные осадки в виде дождя (до 25 мм/ч), снега, града, пыли, что может привести к качественным и количественным изменениям материала [5].

В этой связи исследование влияния климатических факторов в период предстартовой подготовки МКС является необходимым условием наземной экспериментальной отработки элементов конструкции тепловой защиты (ТЗ) [6].

Виды и последовательность испытаний на климатическую устойчивость в каждом конкретном случае определяются с учетом специфики изделия и заданных по тактико-техническим требованиям (ТТТ) условий эксплуатации.

Методика климатических испытаний должна обеспечить надежную отработку элементов конструкции ТЗ при обязательном воспроизведении предельных уровней натуральных климатических воздействий, задаваемых в тактико-техническом задании на эксплуатацию изделия. За исходные принимаются статистические данные по пунктам с экстремальными значениями возможных климатических параметров в регионе хранения и эксплуатации МКС. В эксперименте по климатическим испытаниям должны воспроизводиться воздействия: положительных температур, отрицательных температур, влажности и осадков.

Алгоритм климатических испытаний составляется как единая технологическая цепочка постанов-

ки испытаний при воспроизведении на стенде нескольких одновременных или последовательных экспериментов. Такая технологическая цепочка включает:

— испытание на теплоустойчивость. Реализуют нагрев элемента конструкции ТЗ до определенной температуры и выдержку его с последующей проверкой работоспособности при выбранной температуре. Температура нагрева определяется как сумма годового максимума температуры и возможного солнечного перегрева в заданных условиях эксплуатации [7]. Время выдержки изделия при температуре испытания исчисляется после выхода температуры на стационарное значение. Оно определяется длительностью непрерывного нахождения изделия при эксплуатации в таких условиях с учетом уровня его тепловой инерционности. Статистическая характеристика длительности непрерывного существования положительных температур в очень жарком сухом районе выбирается для Ашхабада и Термеза [7];

— испытание на холодоустойчивость. Реализуют охлаждение элемента конструкции тепловой защиты до определенной температуры и выдержку до выравнивания температуры элемента с температурой окружающей среды с последующей проверкой работоспособности при выбранной температуре. Температура охлаждения выбирается по годовым минимумам температур в таких регионах эксплуатации, как Якутск и Оймякон;

— испытание на влагоустойчивость. Реализуют нагрев и выдержку изделия в камере тепла и влаги с последующей проверкой работоспособности при выбранных значениях климатических параметров. Температура и влажность при испытаниях назначаются по верхним предельным значениям сочетаний температуры и влажности соответствующего региона. Время выдержки после выравнивания температуры в изделии должно быть достаточным для стабилизации состояния по влажности (по опытным данным);

— испытание на воздействие атмосферных осадков. Проводятся в специальных дождевых камерах в течение определенного времени при заданной интенсивности и температуре с проверкой работоспособности. При отсутствии соответствующих указаний в ТТТ на изделие, интенсивность дождя определяется в соответствии с максимальными осадками в регионе эксплуатации изделия [7].

Методика испытания элементов конструкции тепловой защиты на тепло- и влагостойкость включает нагрев до установленной температуры при определенной влажности с выравниваем темпера-

туры изделия и камеры, а также последующую выдержку, соответствующую сроку эксплуатации, и охлаждение до комнатной температуры. Предельные значения температуры воздуха выбираются в соответствии с [7] и заданными тактико-техническими требованиями по условиям эксплуатации изделия. Все эти данные должны соответствовать климатическим режимам регионов. Методика эксперимента должна допускать возможность вариации:

— температура может увеличиваться при условии, что это не приведет к появлению в материалах ТЗ необратимых вредных процессов. Эта операция проводится с целью сокращения длительности эксперимента;

— относительная влажность воздуха должна соответствовать ее максимальному значению при наибольшей температуре. Уровень относительной влажности при испытании может быть повышен с целью сокращения длительности эксперимента; относительная влажность оценивается с использованием выражения

$$\varphi_y = \left[\frac{\sum_{i=1}^e \sum_{j=1}^k \varphi_{эj} \cdot \tau_{эj} \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_{эj}}\right)}{\sum_{i=1}^e \tau_{эi} \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_{эi}}\right)} \right]^{\frac{1}{n}};$$

— время эксперимента, после выравнивания температуры и влажности в объеме испытываемого элемента конструкции, определяется исходя из известного срока службы изделия (продолжительности эксплуатации) по следующей зависимости

$$\tau_y = H \sum_{i=1}^e \sum_{j=1}^k \left(\frac{\varphi_{эy}}{\varphi_y} \right)^n \cdot \tau_{эj} \cdot \exp\left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_y} - \frac{1}{T_{эi}} \right) \right],$$

где T , φ , τ — температура, относительная влажность и время эксплуатации соответственно; E — энергия активации процесса; R — универсальная газовая постоянная; e и k — число градаций температуры и относительной влажности; n — порядок реакции, определяется из эксперимента, в боль-

шинстве случаев близок в единице; H — длительность хранения.

Рекомендуемые значения относительной влажности при испытании на старение применительно к различным климатическим регионам приведены в таблице.

При оценочных расчетах по указанным выше зависимостям следует ориентироваться на максимальные по абсолютной величине значения температуры и влажности соответствующих градаций.

Если температура испытания на старение ограничивается значением суммы предельной температуры воздуха и температуры возможного перегрева, то время выдержки на этом уровне не должно быть меньше суммарной продолжительности существования температуры соответствующей градации.

Как следует из опыта испытаний, необходимая для определения времени эксперимента энергия активации E (эффективное или условное значение) определяется по изменению параметров, характеризующих работоспособность испытываемого элемента конструкций, или же свойств входящих в нее материалов.

Применительно к изделию энергия активации должна определяться по изменению основного параметра, характеризующего работоспособность. При определении энергии активации по элементам длительность тепловлажностного старения изделия должна рассчитываться по минимальному значению энергии активации (по слабому звену). При наличии данных по отказам элементов длительность испытания изделия может определяться с учетом их относительной значимости (долей).

Методика испытания элементов конструкции тепловой защиты на холодостойкость включает:

— определение характеристик режима испытания на стенде с учетом возможных условий эксплуатации. Проводится по результатам статистической оценки отрицательных температур в заданных регионах [7];

— выбор температуры испытания. Проводится с учетом предельных значений годовых минимумов температуры в соответствующем климатическом регионе [7];

Значения относительной влажности для различных климатических регионов

Жаркий сухой, очень жаркий, сухой	Холодный, очень холодный	Умеренно холодный, влажный, умеренно теплый	Умеренно теплый, влажный, теплый влажный, жаркий, умеренно влажный
35—55%	50—70%	60—80%	70—80%

— оценку времени испытаний. Проводится на основании статистических данных по суммарной продолжительности действия соответствующих температур. В зависимости от назначения изделия и особенностей материалов, использованных в его конструкции (возможность внутренних превращений, кристаллизации и пр.), в эксперименте воспроизводится воздействие одной, двух или более градаций, ближайших к выбранной температуре испытания;

— охлаждение исследуемого элемента конструкции до определенной температуры с выравниванием её по объему;

— выдержку до достижения заданной температуры с последующим нагревом до комнатной температуры.

Методика испытания элементов конструкции тепловой защиты на сезонную циклоустойкость включает:

— оценку сходных параметров режима испытания. Базовыми являются предельные значения годовых минимумов и максимумов температур [7];

— последующий циклический нагрев от нижнего до верхнего значения температуры при определенной влажности и обратные переходы (циклы) с выдержкой после выравнивания температуры;

— циклические испытания по годовым циклам изменения климатических режимов с одновременным воспроизведением различных видов воздействий, сопутствующих тепловому и влажностному старению.

Число циклов испытаний на сезонную циклоустойкость должно соответствовать числу лет хранения изделия с возможностью учета смены районов эксплуатации.

Методика испытания элементов конструкций тепловой защиты на суточную циклоустойкость включает циклические испытания элементов конструкции с последовательным переходом от минимального к максимальному значению температуры для соответствующего суточного цикла.

Параметры циклических испытаний должны соответствовать среднестатистической характеристике температурно-влажностных комплексов: температурных перепадов, суточных температурных амплитуд и переходов температуры через нулевое значение при суточных колебаниях [7].

Максимальный и минимальный уровни температур должны определяться с учетом статистических данных по температурно-влажностным комплексам и суточных амплитуд их колебаний.

Относительная влажность при продолжительной температуре должна выбираться по максимальному её значению, соответствующему температуре

нагрева при испытании для заданных условий эксплуатации.

Время экспозиции исследуемой модели при отрицательных и положительных температурах оценивается как при испытании на сезонную циклоустойкость.

Количество циклов определяется с учетом воспроизведения внутренних повреждений, вызываемых случайными температурными перепадами в условиях эксплуатации (при уровне напряжений выше предела усталости или при использовании материалов, не имеющих выраженного предела усталости), а также повреждений, обусловливаемых изменением объема при многократном замораживании материалов, адсорбирующих влагу, даже при уровне напряжений ниже их предела усталости.

При необходимости воспроизведения накопления повреждений, обусловливаемых случайными температурными перепадами и понижающих механическую прочность, расчет количества циклов с выбранной температурной амплитудой основывается на сравнении величин накопленных повреждений применительно к реальным условиям испытаний (с учетом пластических, вязкоупругих и других свойств материала). Ориентировочная оценка числа циклов при этом может основываться на сравнении накопленной усталости с использованием формулы

$$N_y = H \cdot \sum_{i=1}^k \left(\frac{\Delta T_{\text{э}i}}{T_y} \right)^{1/b} \cdot N_{\text{э}i},$$

где N_y — число амплитуд разности температур ΔT_y при ускоренных испытаниях; $N_{\text{э}i}$ — число амплитуд $\Delta T_{\text{э}i}$ при суточных изменениях температуры; k — число градаций различных амплитуд; b — постоянный коэффициент, определяется по соответствующим опытным данным как показатель степени кривой усталости: $\sigma = \sigma_0 N^b$.

Ускоренные испытания на климатическую стойкость должны проводиться по обобщенному режиму, обеспечивающему воспроизведение с учетом установленного срока эксплуатации. Последовательность воздействий устанавливается в каждом конкретном случае с учетом ТТТ на изделие.

Последовательность климатических воздействий в годовом цикле определяется с учетом характера и степени ожидаемого влияния климатических факторов на изделие. В целях сокращения времени испытаний отдельные виды воздействий в пре-

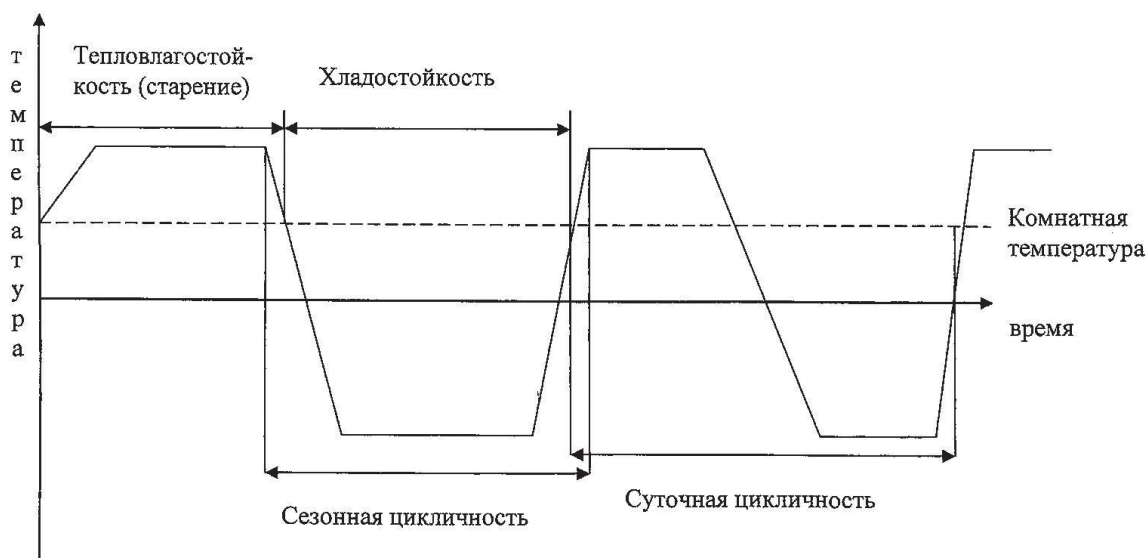


Рис. 1. Примерная схема изменения в эксперименте факторов воздействия в пределах годового цикла

делах годового цикла могут совмещаться, подобно тому как показано на рис. 1.

Экспериментальные средства для отработки многоразовых теплозащитных материалов в условиях перечисленных выше климатических воздействий должны быть составной частью эксперимен-

тальных средств, предназначенных для испытаний ТЗМ в условиях многофакторного воздействия [6, 8, 9]. На рис. 2 представлена схема стенда для воспроизведения многофакторного воздействия на материалы тепловой защиты.

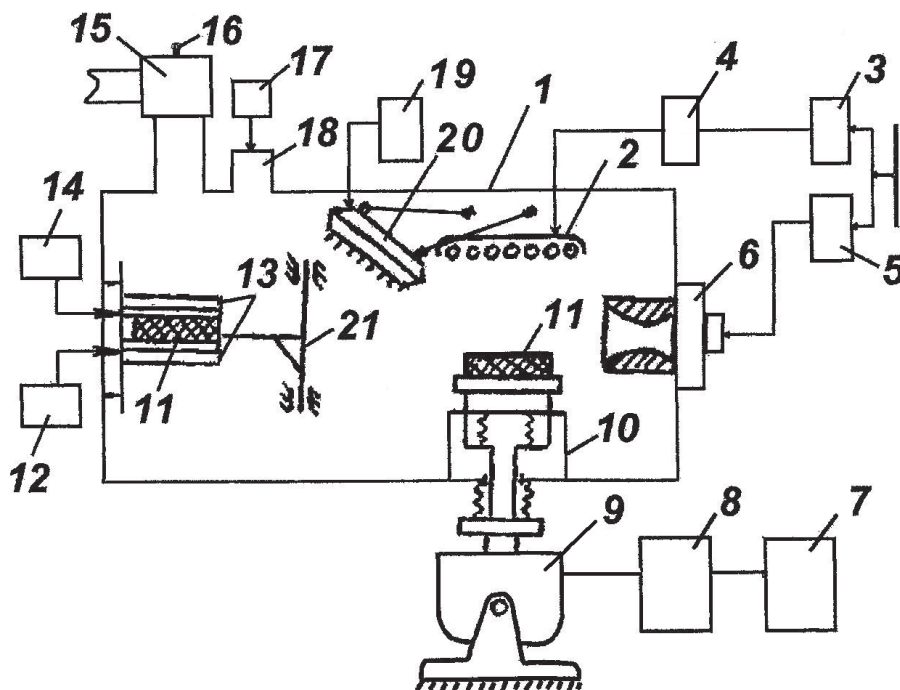


Рис. 2. Сверхзвуковой газодинамический стенд для воспроизведения многофакторного воздействия на материалы тепловой защиты космического летательного аппарата: 1 — вакуумная камера; 2 — инфракрасный нагреватель; 3 — система управления инфракрасным нагревателем; 4 — источник питания нагревателя; 5 — система управления электродугового нагревателя газа (ЭДНГ); 6 — электродуговой нагреватель газа; 7 — источник питания ВЭДС-100; 8 — система питания ВЭДС-100; 9 — высокочастотный электровибратор (ВЭДС-100); 10 — вакуумный ввод электровибратора; 11 — испытуемый образец; 12 — система подачи азота в криогенные панели; 13 — криогенные панели; 14 — система управления температурой криогенных панелей; 15 — вакуумный затвор; 16 — система управления вакуумным затвором; 17 — система управления натекателем; 18 — натекатель; 19 — система управления расходом воды дождевальной установки; 20 — панель дождевальной установки; 21 — поворотная штанга

При проведения перечисленных выше видов климатических испытаний на данном стенде задействованы следующие схемы:

1) испытуемый образец *11*, представляющий собой крупномасштабную модель размером 250×250 мм (элемент конструкции тепловой защиты), устанавливается на рабочем столе поворотной штанги *21*. Общий вид испытуемого образца, размещенного в защитной оправке, показан на рис. 3;

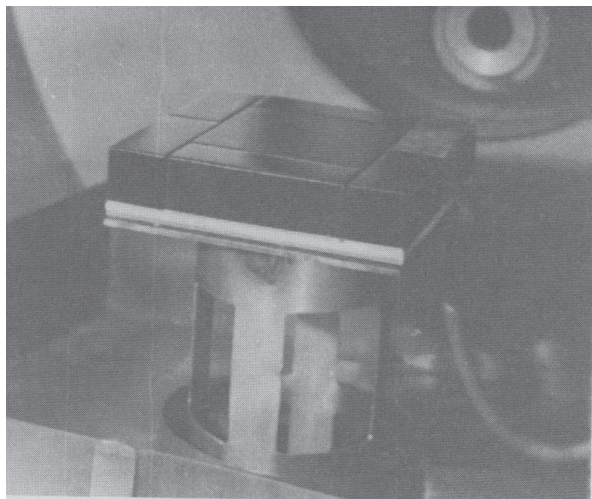


Рис. 3. Общий вид испытуемого образца

2) нагрев исследуемых материалов до заданных температур осуществляется за счет использования инфракрасного нагревателя (рис. 2, позиция 2). Общий вид инфракрасного нагревателя, установленного в вакуумной камере, представлен на рис. 4.

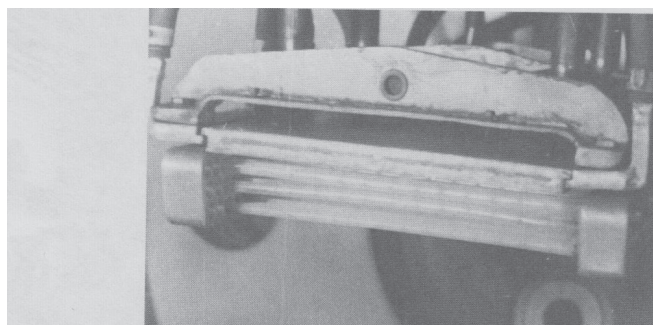


Рис. 4. Общий вид инфракрасного нагревателя, смонтированного в вакуумной камере газодинамического стенда

Инфракрасный нагреватель обладает мощностью 73 кВт с трехрядным расположением излучателей. В качестве излучателей используются кварцевые лампы типа КГ-220-1000. Площадь лучевого отражателя — 480×320 мм.

Максимальная температура поверхности, полученная на ТЗМ при облучении инфракрасным нагревателем, составляла 1700 К. Наибольший темп изменения температуры при нагреве равнялся

70 К/с. Плотность лучистого теплового потока на поверхности модели изменялась путем регулирования электрической мощности, потребляемой лампами. Неравномерность распределения плотности теплового потока по поверхности модели не превышала 3%;

3) захлаживание моделей на стенде осуществляется с помощью криогенных панелей (рис. 2, позиция 13). Общий вид показан на рис. 5. Панели заполняются от танка жидким азотом (рис. 2, позиция 12). Охлаждаемая площадь криогенных панелей имеет размер 280×280 мм. Максимальное расстояние между криогенными панелями 215 мм. Наибольшее усилие поджатия криогенных панелей к модели 120 Н. Минимальная получаемая температура на поверхности криогенных панелей 80 К. Время выхода на режим по температуре исследуемой модели 140 К составляет 30 мин. На каждой криогенной панели со стороны, обращенной к другой панели, размещены легкодеформируемые прокладки и листовые электронагреватели, управление которыми осуществляется от регулятора напряжения (рис. 2, позиция 14). Легкодеформируемые поролоновые прокладки позволяют уменьшить термическое сопротивление пакета;

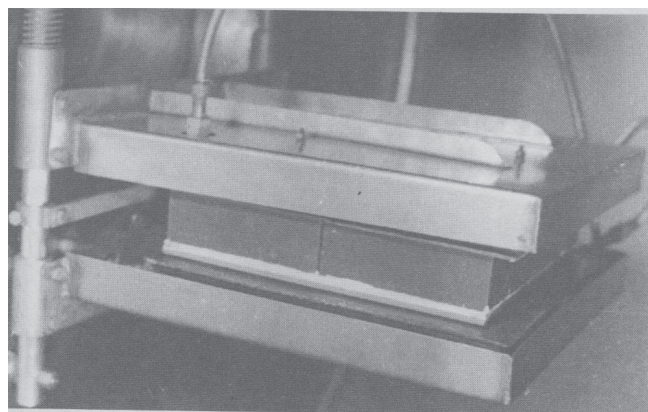


Рис. 5. Общий вид расположения модели из ТЗМ между криогенными панелями захлаживания

4) для имитации осадков на экспериментальном стенде используется дождевальная система, которая позволяет испытывать образцы размером 210×210 мм. Интенсивность дождя до 20 мм/мин. Количество осадков задается регулятором расхода воды (рис. 2, позиция 19). Общий вид дождевальной системы приведен на рис. 6.

Выводы

Предложенные методики и экспериментальные средства проведения климатических испытаний теплозащитных материалов для многофакторных отборочных испытаний элементов теплозащитных

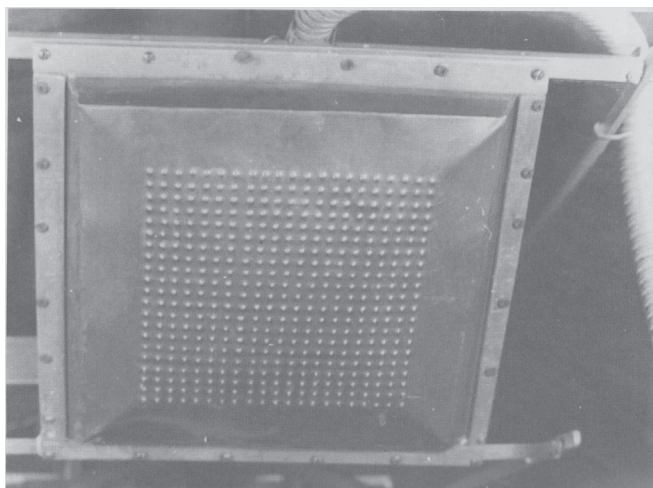


Рис. 6. Общий вид дождевальной системы, смонтированной в вакуумной камере

конструкций плиточного типа могут быть использованы для корректной оценки их работоспособности в условиях наземной отработки.

Полученные результаты должны учитываться как влияние побочных внешних факторов в виде соответствующих коэффициентов, повышающих или понижающих количественные значения основных внешних факторов.

При знании этих коэффициентов наземные испытания узлов и агрегатов КЛА можно проводить, воспроизводя лишь основные внешние факторы, а влияние побочных факторов на работоспособность различных материалов, узлов и агрегатов учитывать введением коэффициентов.

Библиографический список

1. Afanasyev V., Ekonomov A., Tchoudetski I., Tushavina O. Heat and mass transfer in the process of interaction between space bodies and high-speed air flow // International workshop "Tunguska-96" (July 14-17, 1996). Bologna (Italy). University of Bologna. 1996. P. 31.
2. Афанасьев В.А., Никитин П.В., Тушавина О.В., Чудецкий Ю.В. Проблемы испытаний углерод-углеродных композитов для тепловой защиты высокоскоростных летательных аппаратов // Полет. 2004. №3. С. 40-45.
3. Афанасьев В.А. Испытания теплозащитных материалов транспортного космического корабля // Полет. 2004. №9. С. 28-30.
4. Афанасьев В.А., Чудецкий Г.М. Концепция применения искусственных облачных образований в космических исследованиях // Труды МАИ, 2012. № 58. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=33033>
5. Гофин М.Я. Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов. — М.: Изд-во ТФ «МИР», 2003. — 671 с.
6. Афанасьев В.А., Гофин М.Я. Комплексные экспериментальные исследования элементов конструкции ЛА // Тематический сборник научных трудов «Методы экспериментального исследования летательных аппаратов». М.: Изд-во МАИ, 1985. С. 13-16.
7. ГОСТ 16350-80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 9 с.
8. Башилов С.А., Никитин П.В. Метод формирования термостойких защитных покрытий на поверхности углерод-углеродных теплозащитных материалов // Труды МАИ. 2010. № 37. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=13417>
9. Афанасьев В.А., Барсуков В.С., Гофин М.Я., Захаров Ю.В., Стрельченко А.Н., Шалунов Н.П. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов. — М.: Изд-во МАИ, 1994. — 412 с.
10. Купрюхин А.А., Никитин П.В., Сотник Е.В. Экспериментальное определение каталитических и излучательных свойств материалов тепловой защиты КЛА // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 6. С. 98-107.
11. Еришова Т.В., Никитин П.В. Термоэрозионное разрушение теплозащитных материалов в сверхзвуковых гетерогенных потоках // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 5. С. 135-143.

METHODS AND MEANS FOR THERMAL-PROTECTIVE MATERIALS DEVELOPMENT VERIFICATION UNDER CLIMATIC EFFECTS CONDITIONS

Afanas'ev V.A. *, Tushavina O.V. **

Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

* e-mail: vafanasiev@mai.ru

** e-mail: solgtu@gmail.com

Abstract

Revealing climatic conditions effect in the course of pre-launch procedure of reusable space system is a necessary condition of thermal protection structural components ground development. The climatic tests

experiment must simulate positive and negative temperature effects, as well as humidity and precipitation effects. The climatic tests algorithm is designed as a unified processing chain of test set up when a number of simultaneous or consecutive experiments are conducted at the experimental testing bench. The algorithm includes thermal-stability, low-temperature stability, moisture and weather resistance tests. The presented paper describes methods of reusable thermal-protective materials structure testing under the above-mentioned conditions as well as techniques for thermal protection structural elements testing for day-night and seasonal cycling.

Recommendations on carrying out the accelerated tests for climatic firmness are given. The approximate scheme of the main climatic factors affecting heat-protective material change in the experiment within the full-year cycle is presented.

It is noted, that experimental means for carrying out tests in the conditions of climatic influences must present a constituent part of the experimental means intended for the tests in the conditions of multiple-factor impact on of thermal protection materials.

The schematic diagram and photos of the test bench and its components used for heat-shielding reusable materials tests is provided.

The suggested methods and experimental facilities for conducting thermal-protective materials climatic tests on multivariable screen tests of tile-type thermal-protective structural elements can be used for consistent assessment of their working efficiency during ground tests. Ground tests of spacecraft units and plants can be conducted by simulating only the major external factors whereas secondary factors impact can be taken into account by introducing corresponding coefficients.

Keywords: reusable thermal-protective material, climatic testing routine, experimental means for multifactor tests.

References

1. Afanas'ev V., Ekonomov A., Tchoudetski I., Tushavina O. Heat and mass transfer in the process of interaction between space bodies and high-speed air flow. *International workshop "Tunguska-96" (July 14-17, 1996)*. Bologna (Italy). University of Bologna. 1996. P. 31.
2. Afanas'ev V.A., Nikitin P.V., Tushavina O.V., Chudetskii Yu.V. *Polet*, 2004, no. 3, pp. 40-45.
3. Afanas'ev V.A. *Polet*, 2004, no. 9, pp. 28-30.
4. Afanas'ev V.A., Chudetskii G.M. *Trudy MAI*, 2012, no. 58, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=33033>
5. Gofin M.Ya. *Zharostoiki i teplozashchitnye konstruksii mnogorazovnykh aerokosmicheskikh apparatov* (Heat-resistant and heat-protective structures of reusable aerospace vehicles), Moscow, MIR, 2003, 671 p.
6. Afanas'ev V.A., Gofin M.Ya. *Tematicheskii sbornik nauchnykh trudov "Metody eksperimental'nogo issledovaniya letatelnykh apparatov"*, Moscow, MAI, 1985, pp. 13-16.
7. *Klimat SSSR. Raionirovanie i statisticheskie parametry klimaticheskikh faktorov dlya tekhnicheskikh tselei, GOST 16350-80* (Climate of the USSR. Zoning and statistical parameters of climatic factors for technical purposes. GOST 16350-80), Moscow, Standarty, 1981, 9 p.
8. Bashilov S.A., Nikitin P.V. *Trudy MAI*, 2010, no. 37, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=13417>
9. Afanas'ev V.A., Barsukov V.S., Gofin M.Ya., Zakharov Yu.V., Strel'chenko A.N., Shalunov N.P. *Ekspertimetal'naya otrabotka kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* (Experimental testing of spacecraft), Moscow, MAI, 1994, 412 p.
10. Kupryukhin A.A., Nikitin P.V., Sotnik E.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2009, vol. 16, no. 6, pp. 98-107.
11. Ershova T.V., Nikitin P.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2009, vol. 16, no. 5, pp. 135-143.