

## Секция 16

**Наземная отработка реактивных двигательных установок и тепловакуумные испытания космических летательных аппаратов****СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВОДОРОДНОЙ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ КБХА**

*В.С.Рачук, В.И.Пригожин, А.И.Коваль, В.В.Мишин, А.Р.Савич  
(ОАО КБХА)*

Экспериментальная база (ЭБ) КБХА представляет собой комплекс испытательных и вспомогательных установок, обеспечивающих огневые испытания ЖРД усилием от 0,15 до 150 тс в объеме доводочных и сдаточных программ, а также автономные испытания агрегатов двигателя. Работы с водородом в КБХА начались в конце 60-х годов в процессе разработки ядерного водородного двигателя РД 0410 и были продолжены с использованием газообразного и жидкого водорода начались в 80-х годах при огневой доводке запальников двигателя РД-0120.

При создании кислородно-водородного двигателя РД 0146 в 1998 году было начато создание на испытательном комплексе КБХА производства жидкого водорода и реконструкция огневого стенда № 62. Работы были закончены в 2001 году. Жидкий водород в количестве до 5,5...7,5 кг/ч получается по гелиево-водородному конденсационному циклу за счет охлаждения 60...90 нм<sup>3</sup>/ч (6,0...8,5 кг/ч) газообразного водорода в теплообменнике газообразным гелием с температурой 15-17 К. На стенде № 62 проводятся огневые испытания двигателей РД 0146, «холодные» испытания ТНАО и ТНАТ с приводом турбины газообразным водородом высокого давления. Расход жидкого водорода при испытаниях равен 1,5...3,5 кг/с.

Одновременно в КБХА ведутся работы по созданию ацетиленоводородного производства, с целью обеспечения потребности ЭБ в газообразном водороде, который в 10 раз дешевле электролизного водорода.

да, и одновременного получения баллонного ацетилена для продажи. Водород в объеме до 120 м<sup>3</sup>/ч и ацетилен в количестве 40 кг/ч (8 баллонов/ч) планируется получать разложением природного газа в плазмохимическом реакторе при нагревании на водородной плазме до температуры 1600...1800 °С.

Для автономной отработки плазмохимических реакторов создан испытательный стенд со стационарными системами подачи природного газа, водорода, воздуха, воды, системами управления и измерений.

В перспективе на ЭБ КБХА планируется:

- завершить создание ацетиленоводородного комплекса.
- обеспечить утилизацию газифицированного водорода в процессе подготовки и проведении испытаний двигателя, путем применения устройств локализации технологических потерь.

Наличие в КБХА собственной водородной экспериментальной базы позволяет сократить стоимость испытаний двигателей, сроки и стоимость создания новых образцов ракетной техники, сконцентрировать в КБХА разработку и создание кислородно-водородных ЖРД тягой до 50 тс.

Особую актуальность приобретает развитие водородной экспериментальной базы КБХА в связи с освоением новых технологий для получения и использования водорода в автотранспорте, водородной энергетике и других отраслях промышленности. Эти работы проводятся совместно с ИВТ РАН.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ КИСЛОРОДНО-ВОДОРОДНОГО ЖРД НА МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ**

*В.Д.Горохов, С.Д.Лобов, В.Р.Рубинский. В.В.Черниченко  
(ОАО КБХА)*

Для достижения максимальной величины удельного импульса тяги ЖРД чрезвычайно актуальным становится вопрос дальнейшего совершенствования внутрикамерных процессов, и в первую очередь - смесеобразования как совокупности процессов ввода, распределения, распыления и смешения компонентов топлива.

Для улучшения условий распада струи окислителя и интенсификации смесеобразования в соосно-струйной форсунке, в выходной части наконечника выполнены радиальные ребра, а внутренняя поверхность газовой втулки выполнена в виде эквидистантной поверхности пазов наконечника.

Из анализа результатов проведенных огневых испытаний эталонных и усовершенствованных форсунок в составе модельной кислородно-водородной камеры следует, что максимальное значение коэффициента полноты смесеобразования при прочих равных условиях достигается на усовершенствованной форсунке.

Внесенные изменения позволили обеспечить более качественный распыл компонентов топлива, увеличить полноту смесеобразования, и, соответственно, получить прирост удельного импульса тяги на (0,2-0,5)%.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования дают основание полагать, что применение усовершенствованных форсунок для двигателей типа SSME и РД0120 позволит, не изменяя конструкции смесительной головки, обеспечить прирост удельного импульса тяги не менее 10-20 м/с.

Наиболее актуально применение усовершенствованных форсунок для кислородно-водородных двигателей безгенераторной и открытой схем при температуре водорода 100-300К.

Применение указанных усовершенствованных форсунок также целесообразно в кислородно-метановых ЖРД и в различного рода горелках и устройствах для сжигания топлива.

#### **НАЗЕМНАЯ ОТРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОЛЬЦЕВЫМ КРИТИЧЕСКИМ СЕЧЕНИЕМ**

*В.Д.Горохов, Н.А.Дукина, С.Д.Лобов, В.В.Черниченко  
(ОАО КБХА)*

В настоящее время одной из основных проблем при испытании ракетных двигателей и их составных элементов является сложность имитации высотных условий работы двигателя. Для создания условий, близких к натурным, используются дорогостоящие стенды, в состав которых входят газодинамическая труба, вакуум-камера, эжекторная вакуумная установка.

Способ испытаний элементов конструкций ракетных двигателей может быть значительно упрощен при использовании в качестве газодинамического испытательного устройства ракетного двигателя с кольцевым критическим сечением и тарельчатым соплом. Это становится возможным благодаря способности кольцевых сопел к саморегулирова-

нию на режимах, соответствующих режиму перерасширения в круглых соплах. При работе двигателя с кольцевым критическим сечением в земных условиях при наличии атмосферы продукты сгорания топлива после кольцевого критического сечения истекают по поверхности сопла. При этом внутрь кольцевой струи продуктов сгорания попадает окружающий камеру воздух с давлением окружающей среды, который и прижимает продукты сгорания компонентов топлива к поверхности сопла и испытываемых элементов конструкции изнутри по всей линии профиля.

Таким образом, на испытываемый элемент конструкции изнутри действуют продукты сгорания с давлением  $P_{пс}$ , а снаружи – атмосферный воздух с давлением окружающей среды  $P_n$ , что позволяет имитировать натурные условия работы элементов конструкции по силовому нагружению и тепловым потокам.

Проведенные в КБХА огневые испытания созданной принципиально новой камеры с кольцевым критическим сечением подтвердили, что такая камера обеспечивает безотрывное истечение продуктов сгорания из сверхзвукового сопла при больших степенях расширения при наземных испытаниях без применения специальных дорогостоящих устройств.

Конструкция двигателя с кольцевым критическим сечением и представленный способ испытаний защищены патентами РФ на изобретения.

### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОЙ НАДЕЖНОСТИ ЖРД МНОГОКРАТНЫМИ СТЕНДОВЫМИ ИСПЫТАНИЯМИ**

*С.Н.Тресвятский, Д.Г.Федорченко, В.П.Данильченко, Г.А.Игнатов  
(ОАО СНТК им. Н.Д.Кузнецова)*

Для исследования основных факторов, способных обеспечить конкурентоспособность жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), ракетных комплексов, в том числе многоразового применения, необходим концептуальный многофакторный анализ всех направлений развития их с учетом ограничений, накладываемых нормами и законодательством.

Конкурентоспособность двигателя определяется техническим совершенством рабочего процесса, эксплуатационными расходами, надежностью и себестоимостью. Надежность является исключительным свойством. Любое решение, начиная от проектного выбора схемы, и далее при конструировании, разработке технологического процесса, производстве, наземной отработке и сопровождении в эксплуатации,

должно быть сделано с учетом или в пользу надежности. Проблемой является доказательство того, что принимаемые решения обеспечат надежность в последующей эксплуатации.

Представителями двигателей передовых технологий конструирования можно считать кислородно-керосиновые ЖРД «замкнутой схемы»: НК-33 с тягой 1750 кН (172 т) и удельным импульсом тяги 3330 м/с (в пустоте) и ЖРД НК-43 с тягой 1830 кН. (179 т) и удельным импульсом 3560 м/с. Несмотря на то, что эти двигатели создавались в 70-х годах для «лунного» ракетного комплекса Н-1, в них применены следующие проверенные конструктивные решения, обеспечивающие их высокую надежность: стендовая многоразовость работы двигателя; многофорсуночная камера сгорания с высокой полнотой и стабильностью процесса сгорания; новая схема организации горения и смешения в газогенераторе; двухкаскадная энергетическая схема турбонасосного агрегата; принудительный программный запуск двигателя; клапаны топлива дифференциального типа. Многие решения были приняты по рекомендациям сотрудников НИИ ТП, ЦИАМ, НИИ ХИММАША и других отраслевых институтов.

При выборе проектных решений главными были те, которые обеспечивали повышенные запасы работоспособности, подтвержденные в процессе стендовой отработки двигателя. В результате НК-33 обладает высокими запасами по фактическим режимам работы, условиям и числу повторных пусков. Уникальные данные ЖРД НК-33 подтверждены успешными демонстрационными испытаниями их на стендах в России и США после 25 лет хранения двигателей на складе. На одном двигателе за пять пусков было наработано 410 с, включая длительное испытание с форсированием тяги до 114% и длительную работу на «горячем» кислороде при глубоком дросселировании до 50% от номинальной тяги.

Особое место в конструкторских решениях ЖРД НК-33, занимает принцип авиационного подхода к ним при конструировании и отработке, позволяющий выполнить многократные запуски без снятия двигателя со стенда и осуществить повторные переборки двигателей в цехе с восстановлением исходного качества.

Технологическая система методов повышения надежности ЖРД включает в себя внедрение специальных покрытий для защиты деталей от коррозии и эрозии при многократном применении; усовершенствование методов упрочнений деталей методом поверхностного пластического деформирования, методов послеполетного осмотра, очистки, консервации и ремонта деталей.

При серийном производстве ЖРД необходима правильная организация сопровождения, которая позволяет выявлять технологическую

наследственность, критические места и принимать решения по исправлению их путем доработок или новых решений в конструкции.

Эксплуатационная система методов повышения надежности включает совершенствование параметрической диагностики двигателей в процессе их многократной эксплуатации в ракетном комплексе, обработку параметров в темпе полета (работы), реализацию метода эксплуатации ЖРД по техническому состоянию.

### НАЗЕМНАЯ ОТРАБОТКА РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*В.М.Мурашко, А.И.Корякин, Л.В.Махова, А.Г.Нятин*  
*(ФГУП ОКБ «Факел»)*  
*Д.В.Волков, Ю.В.Городилов*  
*(НПО ПМ)*

Проведенное Российской академией космонавтики им. К.Э. Циолковского (РАКЦ) комплексное исследование состояния работ и стратегических направлений развития отечественной космонавтики до 2035 г. определяет оптимальные пути развития космической деятельности в нашей стране в первой половине XXI века. ОКБ "Факел" располагает ключевыми технологиями, позволяющими создавать блоки реактивных двигательных установок космических летательных аппаратов, таких как, например, Экспресс-АМ, разрабатываемых НПО ПМ, обеспечивающих сохранение Россией статуса ведущей космической державы.

Стендовая база ОКБ "Факел" располагает вакуумными камерами (ВК), приборами и оборудованием, позволяющими проводить "огневые" включения двигательных установок (ДУ) укомплектованных двигателями типа СПД-70, СПД-100 и соответствующими системами управления и преобразования (СПУ или АПУ), блоками подачи. При этом АПУ вакуумного исполнения могут располагаться как на рабочей площадке стенда, так и в ВК. В вакуумной камере обеспечивается статическое давление  $5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст., динамическое давление не выше  $2 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.

Приборы и оборудование, стендовые кабели позволяют осуществлять контроль и регистрацию токов и напряжений в цепях питания элементов ДУ, телеметрической информации, формируемой ДУ, давления в магистралях подачи рабочего тела, давления в ВК, суммарного расхода РТ, тяги, развиваемой двигателями. В процессе "огневой" отработки стендовое оборудование ОКБ "Факел" позволяет проводить имитацию нештатных ситуаций: короткое замыкание в цепи анода двигателя с

имитацией как плавного, так и резкого нарастания тока перегрузки, "погасание" двигателя и анализировать реакцию ДУ на данные ситуации.

На стендах ОКБ "Факел" проходили и проходят "огневую" обработку ДУ изделий Купон, SESAT, Экспресс, Экспресс-АМ.

В докладе анализируются основные результаты наземной обработки блоков ДУ ОКБ "Факел" на собственной стендовой базе разрабатываемых для КА нового поколения.

### **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОДУВОК ВОЗДУХОМ СМЕСИТЕЛЬНЫХ ГОЛОВОК КАМЕР ДВИГАТЕЛЯ РД0124**

*Ю.П.Лукин, В.П.Космачева, В.Р.Рубинский  
(ОАО КБХА)*

Важной особенностью при обработке многокамерных двигателей (например, четырехкамерного двигателя РД0124) является обеспечение идентичных для всех камер условий работы. Одинаковые давление, температура и расход компонентов топлива на входе в камеры должны обеспечиваться двигательными системами, а обеспечение равного перепада давления компонентов топлива на смесительных головках с большим числом форсунок является одной из важных камерных задач. Эта задача может быть решена при обеспечении следующих требований:

- высокие требования к точности изготовления смесительных головок и, в большей степени, форсунок;
- проведение продувок воздухом (проливов водой) форсунок и их селекционным отбором для комплектации смесительных головок;
- проведением продувок воздухом (проливов водой) смесительных головок.

Цель проводимого исследования – экспериментальное подтверждение гидравлической идентичности газовых каналов смесительных головок камер двигателей РД0124, изготавливаемых в КБХА.

Представленные результаты продувок воздухом 12-ти смесительных головок в составе камер двигателя РД0124, по нашему мнению, достаточно реально отражают процесс протекания генераторного газа в смесительных головках. Проведенные исследования охватывают степень технологической отработанности процесса испытаний. Достаточность оснащённости испытаний системой непрерывной регистрации измеряемых параметров, а также степень принадлежности камер к одному двигателю разделены на три этапа.

Проведенные исследования показали, что газовые каналы изготавливаемых в КБХА смесительных головок камер двигателя РД0124 в основном идентичны и взаимозаменяемы.

**ОСОБЕННОСТИ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ В  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ  
СГОРАНИЯ ПРИ ПРОДУВКАХ  
ИМИТАТОРОВ ФОРСУНОК  
ВОЗДУХОМ**

*А.К.Недашковский, А.А.Шибанов, В.П.Пикалов, К.П.Денисов  
(НИИХИММАШ)*

Устранение высокочастотных поперечных колебаний давления в камерах сгорания ЖРД до настоящего времени является актуальной проблемой, решение которой желательно осуществлять наиболее простыми и недорогими методами.

В настоящей работе сделана попытка разработки методики, позволяющей в существенно упрощенных условиях (атмосферное давление, комнатная температура, отсутствие горения, одно- или двухфорсуночные смесительные головки) имитировать условия возбуждения высокочастотных поперечных колебаний давления в модельной камере сгорания ЖРД. При моделировании использовано явление возбуждения звука при натекании струи на препятствие. В этом случае источником энергии для возбуждения и поддержания автоколебаний в камере без горения является кинетическая энергия струи. В качестве препятствия применена выравнивающая решетка (хонейкомб), расстояние до которой  $h$  от среза форсунки имитирует длину начального участка зоны горения, главным образом ответственного за самовозбуждение автоколебаний. В одно- и двухфорсуночных модельных смесительных головках использовались форсунки простейшей конструкции в виде трубок, продуваемых воздухом.

Разработана и изготовлена модельная установка, на которой выполнены экспериментальные исследования влияния на положение границ областей самовозбуждения автоколебаний и на амплитуду колебаний некоторых конструктивных параметров форсунок-трубок и модельной камеры сгорания. Описанный подход к моделированию высокочастотной неустойчивости горения в ЖРД применен впервые.

Получено, что области самовозбуждения автоколебаний удовлетворительно обобщаются по безразмерному фазовому критерию  $\Pi = U/f \cdot h$ , где  $U$  – скорость струи,  $f$  – частота колебаний давления.

По результатам экспериментов показано, что многие тенденции влияния конструктивных параметров форсунок, камеры и режимных параметров, полученные на «холодной» модельной установке в условиях без горения, подобны известным тенденциям, наблюдаемым на экспериментальных установках при огневых модельных испытаниях одиночных форсунок или полноразмерных смесительных головок. На «холодной» модели наиболее близко воспроизводятся результаты огневых испытаний форсунок в том случае, если «холодная» модель используется не в однофорсуночном, а в двухфорсуночном исполнении. При этом одна форсунка устанавливается в центре камеры в пучности скорости, а другая – у стенки в пучности давления тангенциальных мод.

**ПРОБЛЕМА ОБРАЗОВАНИЯ НИЗКОТЕПЛОПРОВОДНЫХ  
ОТЛОЖЕНИЙ В ОХЛАЖДАЮЩЕМ ТРАКТЕ КАМЕРЫ  
ЖРД ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ УГЛЕВОДОРОДНЫМИ  
ГОРЮЧИМИ Т-1, НАФТИЛ**

*А.В.Гуменный, В.А.Орлов  
(ОАО КБХА)*

В докладе рассматривается влияние образования низкотеплопроводных отложений (кокса) при охлаждении горючими Т-1, НАФТИЛ камеры ЖРД на температурное состояние оболочки камеры. Представлены результаты обработки экспериментальных данных по термическому сопротивлению осадков для горючих Т-1, НАФТИЛ в зависимости от начальной температуры теплообменной поверхности, а также приводится зависимость интенсивности выпадения кокса с течением времени.

Как правило, исследование процессов теплообмена и коксообразования проводят на круглых трубках с подогревом электрическим током, хотя условия теплообмена в трубках отличаются от процессов теплообмена в трактах охлаждения ЖРД.

Предлагается методика, позволяющая использовать результаты экспериментальных исследований теплообмена и интенсивности коксообразования в круглых трубках для расчетов температурного состояния камер ЖРД, работающих на топливе «кислород + керосин».

В качестве примера приведены результаты расчета температурного состояния одного сечения камеры ЖРД при использовании в качестве охладителя керосинов Т-1 и НАФТИЛ. Обсуждаются особенности полученного решения.

**ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ  
МИКРОПОТОКА ГАЗА**

*А.В.Никипелов, Ю.М.Ермошкин  
(НПО ПМ)*

Используемые в технической практике методы проверки герметичности основаны, как правило, на измерении утечки из объекта испытаний, заполненного контрольным газом с заданным давлением. При применении, например, масс-спектрометрических методов используется гелий. Методов, позволяющих с высокой точностью и чувствительностью измерить суммарную, либо локальную утечку из объекта испытаний, заправленного рабочим газом, не существует. Между тем, наибольший интерес с точки зрения безопасности, надежности и экологии представляет измерение реальной утечки из объекта испытаний после его окончательной заправки рабочим газом (жидкостью). К характерным задачам, которые невозможно решить существующими методами проверки герметичности, в частности, можно отнести: контроль герметичности блоков хранения рабочего газа космического аппарата после заправки реальным рабочим газом; измерение величины утечки из емкости, заправленной токсичным газом; точное измерение утечки водорода через элементы конструкции никель-водородных аккумуляторных батарей; определение герметичности закрытия баллонов с бытовым газом и т.п. Причиной многих аварий, пожаров, отравлений и отказов в технической и бытовой практике во многих случаях является отсутствие методов контроля герметичности объектов, заправленных реальным рабочим газом.

Разработанные (Патенты РФ № 2140624, 2194262, заявка № РСТ/RU01/00280) способ и устройство позволяют измерять микропоток *любого* газа, в том числе и для вышеперечисленных примеров, с погрешностью не более 3 – 5 % при чувствительности  $1 \cdot 10^{-11}$  Вт. Полученные средства могут быть использованы для измерения микропотока любого газа (уникальные возможности контроля герметичности), а также для точного измерения расхода газа (первичные системы градуировки для тепло-массовых расходомеров и других средств измерения расхода любых газов). Измерения проводятся в физических единицах и позволяют определить величину потока в среду с заданными характеристиками, в том числе и в вакуум.

Результаты исследований могут быть использованы для испытаний на герметичность космических аппаратов. Кроме этого, к областям применения относятся: авиационная техника, машиностроение, энергетика, химическая промышленность, измерительная техника, экология, безопасность труда.

**ЖРДМТ КАК ИСТОЧНИК ГЕНЕРАЦИИ  
КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ****В.Е.Низодюк***(Самарский государственный аэрокосмический университет)***А.С.Квашин, А.В.Чечин***(ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс»)*

Большинство современных космических аппаратов (КА) имеют в своем составе двигательные установки (ДУ) с двухкомпонентными жидкостными двигателями, в том числе двигателями малой тяги (ЖРДМТ), которые обеспечивают управление движением КА. В отечественных ЖРДМТ в большинстве случаев используется самовоспламеняющееся топливо НДМГ+АТ. Выхлопные струи ЖРД играют определенную роль в создании собственной атмосферы КА, а также возможном загрязнении внешних поверхностей КА конденсированными продуктами, однако при работе на непрерывных режимах выхлоп ЖРД состоит из высокотемпературных газообразных продуктов, конденсация которых на поверхностях КА весьма маловероятна.

Анализ рабочего процесса ЖРДМТ показывает, что образование и выхлоп из жидкофазных конденсированных продуктов (КП) промежуточных реакций имеет место преимущественно в период задержки самовоспламенения топлива, которое при запуске отечественных ЖРДМТ в вакууме составляет  $\tau_{3В} \sim 3 \dots 8$  мсек. В ЖРДМТ большая часть топлива спользуется на импульсных режимах, при которых доля переходных процессов при запуске и останове двигателя составляет существенную долю продолжительности включения двигателя.

Для получения и сбора КП в количествах, достаточных для исследования их свойств, были разработаны методика и способ препарирования ЖРДМТ, заключающиеся в стабилизации во времени предпламенного процесса в камере сгорания (КС), в период которого образование КП происходит при жидкофазном химическом взаимодействии компонентов топлива, в течение всей продолжительности включения двигателя. При этом обеспечивалась идентичность смесеобразования с исходными образцами двигателей за счет сохранения неизменными основных размеров КС. В работе использовались серийные отечественные ЖРДМТ тягой 100 Н.

Эксперименты проводились в вакуумной камере объемом  $1 \text{ м}^3$  при давлении  $5 \dots 10$  Па. Сбор конденсированных продуктов осуществляется при одиночных включениях продолжительностью  $\tau_{ВК} = 0,35 \dots 2,0$  с и

серии импульсных включений с  $\tau_{BK}=0,03$ с. Давление в КС при этом, в зависимости от давления подачи ( $p_{BX} = 0,5 \dots 1,5$  МПа), составляло  $0,015 \dots 0,04$  МПа. Было накоплено 41 г устойчивых жидкофазных конденсированных продуктов.

Это дало возможность определить массовую долю КП в выхлопе в период  $\tau_{3B}$ , исследовать их основные физико-химические и оптические свойства, поведение при выдержке в условиях низкого давления, получить данные об их капельной структуре и границах распределения КП в выхлопной струе.

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ СОТР

*В.В.Альтов, С.В.Залетаев*

*(Центральный научно-исследовательский институт  
машиностроения)*

*А.А.Аникин*

*(Московский авиационный институт)*

Разработана методика расчета активных систем терморегулирования КА на основе математических моделей агрегатов СТР, таких как трубопровод, радиатор-излучатель, теплообменник, термоплата, тепловой аккумулятор, регулятор расхода жидкости и др., представляемых в виде конечных элементов. В качестве базисных функций элементов используются приближенные аналитические решения уравнений в частных производных, описывающих нестационарный перенос тепла в агрегатах. В результате расчетов определяются расходы и температуры теплоносителей в контурах СТР, хладопроизводительность РТО, температурные поля агрегатов по конструкции СТР.

Для автоматизации построения математической модели СТР разработан графический редактор принципиальных схем, который включен в состав пакета ТЕРМ по расчету тепловых режимов КА, в рамках которого можно провести расчеты динамических процессов в СТР и анализ полученных результатов. Редактор моделей СТР предоставляет пользователю возможность изобразить в клиентской области приложения принципиальную схему газожидкостной СТР, используя палитру моделей агрегатов, содержащуюся в инструментах приложения, задать их теплофизические параметры, используя базу данных приложения. В процессе рисования схемы, редактор генерирует файлы ис-

ходных данных для расчета динамики СТР. Полученная модель СТР включается в полную тепловую модель КА.

На основе пневмогидравлической схемы газожидкостной СТР грузового транспортного корабля (ГТК) типа «Прогресс» построена расчетная схема и тепловая математическая модель КА с учетом СТР. Модель включает два газо-жидкостных контура, магистрали змеевиков обогрева корпуса, магистрали шестисекционной панели РТО, регулятор расхода жидкости. Математическое моделирование позволило определить тепловые режимы и температурные поля элементов КА для условий орбитального полета.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

*И.А.Зеленов, Д.В.Тулин, А.Ф.Шабарчин*  
(Научно-производственное объединение им. С.А.Лавочкина)

Рассматривается способ сокращения продолжительности комплексных тепловакуумных испытаний, примененный НПО им. С.А.Лавочкина при наземной отработке космического аппарата «Спектр». Вопрос продолжительности испытаний является особенно актуальным при разработке крупногабаритных КА, т.к. стоимость каждого часа испытаний в крупногабаритной вакуумной камере с имитатором солнечного излучения, как правило, очень высока.

Рассматриваемый способ ТВИ является экспериментально-теоретическим исследованием теплового режима КА, включающим компьютерное моделирование теплового режима объекта испытаний и введение в программу испытаний тестовых режимов, обеспечивающих возможность уточнения тепловой математической модели исследуемого КА и подтверждения ее надежности. С применением данного способа были проведены комплексные тепловакуумные испытания научной аппаратуры КА «Спектр-РГ» и астрофизического модуля «Спектр-Р». В результате продолжительность тепловых испытаний этих КА в вакуумной камере ВК 600/300 (НИИХИММАШ) была сокращена в 2...3 раза по сравнению с продолжительностью испытаний, проведенных для предшествующих изделий-аналогов.

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ИМИТАТОРА ВНЕШНИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ НА КА С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАРЦЕВЫХ ГАЛОГЕННЫХ ТРУБОК**

*В.Н.Васильев, Р.М.Копяткевич, Г.С.Мишин, П.М.Рябов,  
Н.В.Саква*

*(Центральный научно-исследовательский институт  
машиностроения)*

При проведении тепловакуумных испытаний в тепловакуумных камерах, не оснащенных имитаторами солнечного излучения воспроизведение внешних тепловых потоков от Солнца и Земли может осуществляться с помощью инфракрасных имитаторов и имитаторов на основе кварцевых галогенных трубок (КГТ). По спектральному составу излучение КГТ охватывают видимую и ближнюю инфракрасную области спектра. Если при использовании тепловых конформных нагревателей воспроизводятся результирующие потоки, то при использовании имитаторов с КГТ воспроизводятся поглощенные лучистые потоки.

Для выбора проектных параметров конструкции имитатора с КГТ разработаны математические модели излучения имитаторов, состоящих из кварцевых галогенных трубок, отражателей и дополнительных экранов.

Получены расчетные формулы, описывающие параметры лучистого поля на плоской вертикальной поверхности как от одиночного излучателя, так и от группы излучателей. Выполнена оптимизация группового излучения с целью получения максимальной равномерности потока. Определена степень неравномерности и уровни тепловых нагрузок в зависимости от расстояния имитатора до объекта испытаний для различных конструктивных исполнений имитатора. На основе выполненных экспериментов исследован спектральный состав лучистого поля и получена облученность поверхности объекта испытаний (ОИ) в различных спектральных поддиапазонах в зависимости от напряжения питания КГТ. Диапазон подаваемого напряжения на КГТ составлял от 40 до 200 В. Спектральный состав излучения определялся с помощью стандартных светофильтров СКФ и МДР-12.

В качестве примера рассмотрено воспроизведение внешних тепловых потоков на макет геостационарного КА, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда. Проведенные расчетно-экспериментальные исследования показали, что для имитации внешней тепловой нагрузки на плоские грани без выносного оборудования на каждой панели имитатора внешнего теплового потока должны располагаться 12 излучателей при условии, что размеры панелей совпадают с размерами боковых граней  $\sim 2000 \times 1600$  мм, а излучатели располагаются в 4 яруса по 3 в каж-

дом ярусе высотой ~400 мм. Расчетная мощность каждого излучателя изменяется в пределах от 116 до 180 Вт. Неоднородность внешних потоков по грани ОИ не превышает  $\pm 7\%$ .

### **ИМИТАТОР ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ТЕПЛО ВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ СПУТНИКА «EGYPTSAT-1»**

**Ю.В.Петров, Н.П.Сивошапка,  
(Государственное конструкторское бюро "Южное")**

**А.М.Кислов, А.И.Церковный  
(Специальное конструкторско-техническое бюро по КТ ФТИНТ)**

Имитатор излучения Земли (ИИЗ) предназначен для облучения элементов испытываемого КА управляемым потоком ИК-излучения и воспроизводит на элементах КА суммарную плотность поглощенных потоков собственного и отраженного солнечного излучения Земли, воздействующих на КА в орбитальном полете.

ИИЗ представляет собой систему панелей с дискретными линейчатыми излучателями, которые нагреваются электрическим током до температур, соответствующих требуемым значениям плотностей потоков, поглощаемых элементами КА при движении на витке.

Отличительной особенностью разработанного ИИЗ является то, что панели излучателей закреплены на опорно-поворотном устройстве в тепловакуумной камере и вместе с КА совершают программные повороты относительно потока излучения от имитатора Солнца. При этом имитируется суммарный поток собственного и отраженного солнечного излучения Земли. Это позволяет воспроизводить в наземных испытаниях нестационарные тепловые режимы КА на витке при изменении потоков излучения от имитаторов излучения Земли и Солнца на поверхности элементов КА. ИИЗ не воспроизводит угловое распределение натуральных потоков излучения от Земли, падающих на элементы КА при его движении на заданном витке орбиты.

Все панели разделены на 3 секции, в каждой секции излучатели имеют свою, но одинаковую температуру. Секция 1 облучает плиту установочную КА и частично боковые стенки корпуса. Секция 2 облучает боковые стенки корпуса и нерабочие стороны панелей солнечных батарей. Секция 3 облучает нерабочие стороны панелей солнечных батарей и боковые стенки корпуса КА.

Средние значения плотности потоков ИК-излучения от ИИЗ, падающих на тепловые экраны, плиту установочную и нерабочие стороны

панелей солнечных батарей, определены на основании расчетов, проведенных с использованием пакета программ TRASSA-2 разработки СКТБ ФТИНТ (г. Харьков).

Совмещение отраженного от Земли солнечного излучения и собственного излучения Земли в один поток ИК-диапазона возможно вследствие того, что значения оптических коэффициентов  $A_s$  и  $\epsilon$  на наружной поверхности КА отличаются друг от друга не более, чем на 10%. Данное решение задачи позволяет значительно упростить конструкцию и снизить затраты на разработку и изготовление устройств тепловакуумной камеры.

#### ТЕПЛО ВАКУУМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КА «МИКРОН» В ТВК-2,5

*Т.А.Таранова*

*(Государственное конструкторское бюро "Южное")*

Процессы теплового взаимодействия КА с внешними источниками тепла, хорошо изученные на сегодняшний день, могут быть определены с высокой степенью точности. Однако внутренние тепловые связи электронных приборов между собой и элементами конструкции КА с достаточной достоверностью можно определить только экспериментальным путем. Поэтому должно быть обеспечено гармоничное сочетание методов расчетно-теоретического анализа и наземной экспериментальной отработки КА, т.к. ни один из этих подходов в чистом виде не может обеспечить полностью адекватное отображение процессов, имеющих место в натуральных условиях.

Для проверки выполнения требований по тепловому режиму КА при имитации условий его функционирования на орбите были проведены тепловакуумные испытания теплового макета КА «Микрон» на установке ТВК-2,5 НТУУ КПИ (г. Киев) в 2001 г.

Т.к. данная установка из-за небольших размеров не снабжена имитаторами излучения Земли и Солнца, внешние лучистые тепловые потоки имитировались пленочными электронагревателями, которые наклеивались на наружные поверхности стенок макета КА «Микрон», фотоэлектрических батарей, гравитационного стабилизатора, плиты установочной. Суммарные внешние тепловые потоки излучения Солнца, альbedo и Земли, поглощаемые элементами конструкции на орбите, были определены с помощью пакета программ TRASSA-2 разработки СКТБ ФТИНТ (г. Харьков).

Вместо действующих приборов на макете КА использовались тепловые макеты приборов, по размерам, массе и теплофизическим

характеристикам соответствующие штатным. Мощность, рассеиваемая приборами, также имитировалась с помощью пленочных электронагревателей, которые наклеивались на участки поверхности предполагаемого тепловыделения приборных плат рамочных модулей. Имитируемые значения мощностей внутренних тепловыделений в приборных рамочных модулях задавались в соответствии с энергопотреблением самих приборов.

Описана тепловая обработка изделия для 4-х режимов внешнего и внутреннего теплоподвода к КА. Приведены и проанализированы результаты исследования воздействия тепловых нагрузок на макет КА «Микрон».

Метод обработки привлекателен своей простотой и дешевизной вследствие принятой имитации внешних и внутренних источников тепла без использования имитаторов излучения Земли и Солнца.

#### **ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОТР ПРИ ТВИ**

***С.И.Королев, С.Я.Чакчир***  
***(Балтийский государственный технический университет  
«Военмех» им. Д.Ф.Устинова)***

Диагностирование температурного состояния СОТР на штатных и аварийных режимах функционирования является одной из актуальных задач тепловакуумных испытаний (ТВИ). Особого внимания при проведении ТВИ заслуживают различные аварийные ситуации, связанные с внезапными отказами теплообменного оборудования (регуляторов расхода теплоносителя, гидронасосных агрегатов, теплообменных аппаратов и т.д.) Для решения поставленной задачи были разработаны методы диагностирования температурного состояния, основанные на анализе и идентификации динамических характеристик СОТР.

В основу построения методов положено утверждение, согласно которому каждая неисправность элемента СОТР совершенно определенным образом искажает физическую картину переходного процесса системы. Анализ работоспособности осуществляется по переходному процессу и характер процесса в каждом конкретном случае будет соответствовать определенной неисправности, т.е. по характеру изменения переходного процесса можно однозначно судить о характере неисправности.

Отсюда возникает необходимость построения таких тестов выходных переходных характеристик, набор которых однозначно бы определял принадлежность последних к тому или иному виду отказа. Результат проведения такого набора тестов и их специальной обработки - представляет собой идентификационную маску (ИМО).

ИМО - уникальный параметр, определяющий принадлежность конкретной переходной характеристики динамической системы к тому или иному виду отказа. Разработанные методы и модели позволяют по переходным характеристикам выходных контролируемых параметров зафиксировать факт параметрического отказа и определить отказавший элемент системы. Применение разработанного метода идентификационных масок, получаемых путем сжатия информации тестов-проверок переходных характеристик системы, позволяет в значительной степени сократить объем хранимой исходной информации для реализации алгоритма диагноза. Методы просты и могут быть использованы для автоматизированного диагностирования любых динамических систем при проведении ТВИ.

Методы отработаны на программном комплексе имитационного моделирования типовой многоконтурной прецизионной СОТР, используемой на ряде КА ДЗЗ. Реализация представленных методов диагностирования температурного состояния при проведении ТВИ будет способствовать повышению надежности и эффективности функционирования СОТР в условиях летной эксплуатации.

### **РАЗВИТИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ КА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ПРОГРАММ ТЕРМ**

*В.В.Альтов, С.В.Залетаев, Р.М.Копяткевич  
(Центральный научно-исследовательский институт  
машиностроения)*

Пакет ТЕРМ, предназначенный для численного моделирования тепловых режимов КА в условиях орбитального полета, разрабатывается в ЦНИИМАШ, начиная с 1985 года. В настоящее время пакет ТЕРМ используется во многих КБ России, среди которых РКК «Энергия», ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, НПО им. А.С. Лавочкина и др. создают сложные тепловые математические модели, содержащие десятки тысяч расчетных элементов. В пакете используются математические модели трех классов: модели метода тепловых балансов (ТБ), модели метода конечных элементов (МКЭ) и модели СТР. До последнего времени со-

здание таких моделей было очень трудоемкой задачей, так как пользователю приходилось вводить команды описания моделей с помощью обычного текстового редактора. В новой версии пакета ТЕРМ по сравнению с предыдущей для каждого класса моделей разработаны специальные редакторы создания моделей, при использовании которых пользователь вводит только численные значения определяющих параметров. Редакторы моделей МКЭ и СТР разработаны вновь, а редактор моделей ТБ значительно усовершенствован. Новый редактор моделей ТБ позволяет разбивать расчетные изотермические узлы на произвольное число элементов путем автоматического нанесения сеток и вычисления кондуктивных тепловых связей между ними. Такой подход значительно упрощает возможность построения сложных расчетных моделей и нахождения трехмерных полей температур по конструкции КА. Разработанный новый графический редактор СТР аналогично редактору тепловых моделей ТБ позволяет пользователю достаточно просто создавать расчетные модели активных СТР. Разработана методика расчета активных систем терморегулирования КА на основе математических моделей агрегатов СТР, таких как трубопровод, радиатор-излучатель, теплообменник, термоплата, тепловой аккумулятор, регулятор расхода жидкости и др., представляемых в виде конечных элементов.

Модель МКЭ строится с использованием изопараметрических конечных элементов. В качестве базисных функций для описания формы элемента и аппроксимации распределения температуры на конечном элементе применяются квадратичные координатные функции. Это дает возможность определить значение температуры в любой точке элемента по найденным температурам в узлах конечного элемента, а также построить непрерывные трехмерные температурные поля. Редактор моделей МКЭ позволит создавать расчетные модели, содержащие как конечные элементы, так и изотермические узлы. Использование МКЭ сократит время счета по сравнению с методом ТБ за счет уменьшения числа расчетных элементов и использования неявной расчетной схемы.

#### **ВОПРОСЫ ОТРАБОТКИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ИК-ПРИЕМНИКА КА ДЗЗ**

*Д.К.Винокуров, Г.С.Мишин.*

*(Центральный научно-исследовательский институт  
машиностроения)*

В целях обеспечения выбора режимов и методики испытаний ИК-приемника при ТВИ радиометра рассмотрено упрощенное конструктивное исполнение ИК-радиометра и проведены расчеты его теплового режима для условий полета КА ДЗЗ. Основные компоненты радиометра:

рефлектор, расположенный на дне теплоизолированного тубуса (ЭВТИ с термическим сопротивлением не менее  $50 \text{ Км}^2/\text{Вт}$ ); стакан из меди с чувствительным элементом ИК-приемника, а также бленда с крышкой. В качестве чувствительного элемента используется ИК-матрица, размещаемая на площадке на дне стакана. Общая длина радиометра 1.6 м, диаметр 0.6 м. Предполагается, что на каждом витке суммарная длительность сеансов наблюдений не превышает 15 минут.

Для нормального функционирования приемника требуется обеспечить поддержание заданных температурных условий оптико-механического блока с блендой, фотоприемных устройств с газовыми криогенными машинами и блока электроники.

СОТР ИК-радиометра состоит из ЭВТИ, тепловых труб, терморегулирующих покрытий и холодильной машины, подающей жидкий азот к чувствительному элементу и к поверхности стакана. СОТР обеспечивает температуру чувствительного элемента на уровне 80К, стакана – 130 – 150К.

Расчеты проводились для полета по круговой орбите высотой 500 км и наклоном  $90^\circ$ .

Как показали расчеты для нормального функционирования радиометра необходимо отводить тепло от стакана 5-10 Вт, тубуса до 110 Вт, ИК-приемника 0.2 Вт.

Результаты измерений при ТВИ позволят уточнить математическую модель объекта и методику переноса результатов испытаний на натурные условия.

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕПЛО ВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ  
ЛЕПЕСТКА ПАРАБОЛИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОРА  
КОСМИЧЕСКОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА КА «СПЕКТР-Р»**

*И.С.Виноградов*

*(Астрокосмический центр ФИАН),*

*С.Б.Новиков*

*(Центральный научно-исследовательский институт  
машиностроения),*

*А.Ф.Шабарчин*

*(ФГУП НПО им. С.А.Лавочкина)*

Трансформируемый рефлектор ( $d = 10 \text{ м}$ ) состоит из центральной жесткой части ( $d = 3 \text{ м}$ ) и 27 однотипных раскрывающихся в космосе лепестков, тепловая связь между которыми незначительна. Лепесток состоит из оболочки и закрытого ЭВТИ силового каркаса на основе уг-

лепластиковых труб. Основные элементы рефлектора выполнены из композиционных материалов.

Значительные габаритные размеры рефлектора не позволяют провести его полномасштабные тепловакуумные испытания (ТВИ) на отраслевой экспериментальной базе. Проведены автономные тепловакуумные испытания (ТВИ) лепестка рефлектора в ВК-27 НПО им. С.А.Лавочкина и разработана тепловая математическая модель (ТММ) рефлектора, которая уточняется по результатам ТВИ лепестка.

При проведении ТВИ лепестка в ВК-27, оснащенной криогенными азотными экранами, поглощенный поверхностями лепестка солнечный поток имитировался сетчатыми электронагревателями. По результатам ТВИ определены предельные температурные режимы лепестка при воздействии солнечного потока, частичном и полном экранировании лепестка от солнечного потока элементами КА, произведено уточнение ТММ лепестка в части удельного сопротивления ЭВТИ каркаса, продольной теплопроводности углепластиковых труб каркаса ( $\lambda=6$  Вт/мК), тепловой проводимости между кронштейнами каркаса и расположенными на них углепластиковыми трубами каркаса (0.04 Вт/К), а также между кронштейнами и оболочкой по соединяющим их шпилькам.

Проведенный анализ позволил дать рекомендации по доработке системы обеспечения теплового режима рефлектора, в том числе по: - увеличению мощности электронагрева углепластиковых труб каркаса с 11 Вт до 18 Вт; - изменению удельного сопротивления ЭВТИ каркаса с  $10 \text{ Км}^2/\text{Вт}$  до  $20 \text{ Км}^2/\text{Вт}$ ; - замене материала шпилек, соединяющих силовой каркас с оболочкой лепестка, с нержавеющей стали на титан, что позволило почти в 2 раза уменьшить теплообмен между каркасом и оболочкой.

---