

## ОТЗЫВ

### официального оппонента

на диссертацию Урбанского Владислава Александровича, выполненную на тему «Методика выбора структуры и основных параметров пневмогидравлической системы возвращаемого ракетного блока», представляемую на соискание учёной степени кандидата технических наук

Диссертационное исследование посвящено разработке новой расчётно-экспериментальной методики выбора структуры и основных параметров пневмогидравлической системы (ПГС) возвращаемого ракетного блока (РБ) ракеты-носителя (РН). Результатом внедрения такой методики должно стать улучшение тактико-технических характеристик РБ за счет снижения масс конструкции и рабочего тела систем наддува (СН) топливных баков и обеспечения запуска (СОЗ) маршевого двигателя РБ и добавления нового качества ПГС, позволяющего снизить техногенное воздействие на окружающую среду при эксплуатации РБ в штатных и нештатных ситуациях.

### Актуальность избранной темы

В настоящее время в Российской Федерации и других странах, имеющих независимый доступ в космическое пространство, активно ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) по созданию ракет-носителей с возвращаемыми первыми ступенями. К таким работам относятся разработки космического ракетного комплекса (КРК) «Амур-СПГ» и других в РФ, РН «Callisto», «Themis», «Ariane Next» (ЕКА), РН «Changzheng-9» (Китай). В США активно эксплуатируется РН "Falcon 9" ("SpaceX").

Создание подобных систем существенно (до 2-х раз) снижает стоимость выведения полезного груза (ПГ) на орбиту, однако, требует оснащения первой ступени системами, обеспечивающими в условиях малых знакопеременных возмущающих усилий необходимое количество повторных запусков маршевого ЖРД, управляемый полёт отработавшего РБ 1-й ступени к месту посадки, необходимое тепловое состояние РБ 1-й ступени при полёте в плотных слоях атмосферы. Ключевыми системами, которые обеспечивают условия повторного запуска ЖРД, являются СН топливных баков ступени РБ и СОЗ. Снижение массы конструкции и рабочих запасов газа этих систем является актуальной задачей для увеличения конкурентоспособности и эффективности разрабатываемых возвращаемых РБ.

Значительное техногенное воздействие на окружающую среду при пусках РН проявляется в районах падения отработавших РБ 1-й ступени. Принятие современного зако-

Входящий № 217-8522  
Дата 09 НОЯ 2023  
Самарский университет

нодательства об охране окружающей среды позволило органам местной власти предъявлять требования по возмещению ущерба, нанесенного падением отделяющихся частей (ОЧ) РН на землю, их разрушением с проливом остатков топлива. Решением проблем снижения техногенного воздействия в районах падения ОЧ РН также является переход на создание возвращаемых РБ 1-й ступени РН с возможностью повторного запуска маршевого жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) для обеспечения управляемого спуска РБ и его мягкой посадки.

Увеличение количества запусков с оставлением 2-х ступеней РН на орбите после выполнения миссии привело к резкому росту количества космического мусора. Согласно приведенным автором оценкам, более 42% оставленных на орбите объектов являются отработавшими вторыми и третьими ступенями РН с жидкими остатками компонентов ракетного топлива (КРТ) в баках. Наличие жидких остатков КРТ содержит потенциальную опасность их газификации под воздействием внешних тепловых потоков и разрушения топливных баков с образованием обширных облаков мелких осколков.

При исследовании процессов газификации жидких остатков топлива в баках РБ, перед разработчиками не стояла задача обеспечения использования баков для возвращаемых РБ 1-й ступени РН, в частности, исследования влияния внешнего аэродинамического потока на процесс тепло- и массообмена в топливном баке. Расширение функций СН и СОЗ обеспечит как удаление жидких остатков топлива из баков РБ, так и управляемый увод 2-й ступени на орбиту захоронения.

Избранная тема диссертации «Методика выбора структуры и основных параметров пневмогидравлической системы возвращаемого ракетного блока» является актуальной, так как обеспечивает решение задачи увеличения конкурентоспособности и эффективности разрабатываемых возвращаемых РБ путём снижения массы конструкции и рабочих запасов газа систем наддува и обеспечения запуска и техногенного воздействия на окружающую среду при пусках РН.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Автором вынесены на защиту следующие положения:

1. Структура, основные параметры и алгоритм функционирования ПГС возвращаемого РБ. Основными отличиями предложенных технических решений являются применение для наддува топливного бака окислителя (О) смеси подогретого гелия и осушенных продуктов разложения перекиси водорода (ПВ), использование газа наддува бака О для работы газовых сопел СОЗ на пассивном участке полёта ступени, использование продук-

тов разложения ПВ для газификации остатков жидкого кислорода в баке с целью их удаления.

2. Математическая модель процесса тепло- и массообмена в топливных баках РБ при функционировании ПГС. Модель учитывает испарение и конденсацию кислорода в баке РН при наддуве, смену режимов парообразования топлива при изменении величины теплового потока от горячего газа наддува и аэродинамического потока.

3. Результаты оценки применения решений по конструкции ПГС возвращаемого РБ на всех участках траектории полёта в сравнении с существующей системой, а также возможности ликвидации жидких остатков топлива в баке О. Автором определён массовый выигрыш от применения предложенных решений.

Структура ПГС разработана на основании системного подхода к построению сложных технических систем. Автором путём анализа весовых сводок новой и существующей структуры ПГС показана эффективность разнесения по времени запуска теплообменника СН и запуска маршевого двигателя и частичного совмещения рабочих тел СН и СОЗ. В результате моделирования тепло- и массообменных процессов показана возможность удаления жидких КРТ на участке возвратного полёта РБ.

Математическая модель процессов тепло- и массообмена в топливном баке РБ построена на основе законов сохранения массы и энергии. Интегрирование системы дифференциальных уравнений, описывающей указанные процессы, выполнено известным методом Рунге-Кутты.

Модель верифицирована с использованием экспериментальной установки для исследования процессов тепло- и массообмена в криогенной емкости. Автор экспериментально изучил смену режимов парообразования криогенной жидкости в макете топливного бака и включил описание критериев смены режимов парообразования в математическую модель.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы в достаточной степени.

#### **Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Материалы диссертационного исследования изложены в 20 публикациях: 7 статей в журналах из списка рецензируемых научных изданий ВАК РФ, 4 статьи в журналах, индексируемых в базе данных Scopus, 4 статьи в сборниках трудов научных конференций, получено 5 патентов на изобретения.

Основные результаты диссертационного исследования докладывались на международных и российских научно-технических конференциях.

Адекватность разработанной математической модели и процессов тепло- массообмена в топливном баке подтверждается сравнением результатов, полученных с использованием разработанной математической модели, с данными, полученными в ходе экспериментального исследования. Получено удовлетворительное совпадение результатов расчёта и эксперимента для случая отсутствия стратификации (теплого расслоения) газа в газовой полости («подушке») бака, характерного для стационарного режима наддува бака.

Получены акты внедрения результатов диссертационной работы в АО «ЦНИИ-маш», АО «РКЦ «Прогресс». Результаты исследования внедрены в учебный процесс кафедры «Авиа- и ракетостроение» Омского Государственного технического университета (ОмГТУ) в виде практических занятий для студентов старших курсов по дисциплинам «Проектирование ракетных и ракетно-космических комплексов», «Проектирование специальных систем»

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждена в необходимом объёме.

**Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации:**

1. Предложена структура ПГС возвращаемого РБ, отличающаяся от существующих тем, что:

1.1. Для работы газореактивных сопел СОЗ используется смесь гелия и продуктов разложения перекиси водорода (ПВ), что позволяет сократить рабочие запасы газа СОЗ и массу шар-баллонов (ШБ) для хранения рабочего тела СОЗ;

1.2. Наддув бака О осуществляется газовой смесью из подогретого гелия и обезвоженных продуктов разложения ПВ, нагрев гелия осуществляется продуктами разложения ПВ, при этом теплообменники системы наддува отделены от ЖРД и расположены в верхней части топливного отсека, что позволяет уменьшить длину магистралей газа наддува и сократить рабочие запасы газа на наддув топливных баков.

1.3. Организована подача в бак О горячих продуктов разложения ПВ, что позволяет испарить остатки топлива и совершить их сброс за борт РБ после завершения миссии, для чего установлена магистраль подачи газа из бака О на сопла СОЗ.

2. Предложен объединённый алгоритм функционирования ПГС возвращаемого РБ на всех участках траектории его полёта – подготовка СН, активный участок полёта РБ, режим возвратного полёта РБ, удаление остатков жидких КРТ из топливных баков.

3. Разработана математическая модель процесса тепло- и массообмена в топливных баках РБ на всех этапах функционирования ПГС, учитывающая испарение и конденсацию топлива в баке РБ при вводе газа и смену режимов парообразования топлива при изменении величины теплового потока от горячего газа и аэродинамического потока. На базе математической модели автором разработана комбинированная методика расчёта СН топливного бака, что позволило определить основные параметры ПГС, оценить возможность обеспечения удаления остатков топлива из баков РБ, а также оценить применение предложенной системы в сравнении с традиционными СН. Научная новизна математической модели определяется комплексным учётом процессов испарения и конденсации топлива на всех этапах функционирования ПГС.

Необходимо отметить чёткое обоснование автором научной новизны работы с указанием отличий от достигнутого научно-технического уровня.

#### **Отмеченные недостатки:**

1. Определение автором объекта исследований не соответствует действующей нормативной и технической документации. Состав ПГС не исчерпывается системой наддува (СН) и системой обеспечения запуска (СОЗ). В работе упомянуты система дренажа и внутрибаковые устройства обеспечения сплошности КРТ на входе в маршевый ЖРД. Эти системы, как и система питания ЖРД, используются в процессе удаления жидких КРТ из баков после завершения полёта ступени.

2. В работе не проведено сравнение эффективности РБ с предложенной схемой ПГС с объединёнными по рабочему телу СН и СОЗ и РБ, оснащённого двигательной установкой (ДУ) СОЗ с 2-хкомпонетными двигателями малой тяги (ДМТ). Применение последнего варианта обеспечивает существенное сокращение запасов топлива ДУ СОЗ за счёт большего значения удельного импульса тяги ДМТ.

3. В работе не рассмотрена организация удаления остатков горючего из бака. Основной проблемой при приведении в безопасное состояние отработавших (в том числе, аварийных) 1-х ступеней РБ является удаление остатков именно высококипящих КРТ, являющихся токсичными и легковоспламеняющимися жидкостями.

4. Описание математической модели не является полным:

4.1. Отсутствуют принятые ограничения и допущения;

4.2. Ряд эмпирических параметров и формул приведён без ссылки на литературный источник;

4.3. Отсутствует описание алгоритма дренажа топливного бака, при этом расход на дренаж входит в расчётные уравнения;

