

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Кретинина Александра Валентиновича

на диссертационную работу

Василевского Дмитрия Олеговича

«Способ увеличения удельного импульса тяги за счёт интенсификации теплообмена в системе охлаждения камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки)

Диссертационная работа Василевского Д.О. посвящена увеличению удельного импульса тяги безгазогенераторного жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) за счёт увеличения давления в камере сгорания (КС) и поверхности теплообмена в цилиндрической части КС.

Целью данной работы является повышение удельного импульса тяги (УИТ) безгазогенераторного кислородно-водородного ЖРД, а также определению оптимальных параметров системы охлаждения и внутреннего охлаждения двигателя.

Актуальность данной работы обусловлена перспективой применения безгазогенераторной схемы ЖРД в составе разгонных блоков (РБ) и межорбитальных транспортных аппаратов (МТА). На данный момент разработанные проекты ЖРД безгазогенераторной схемы за счёт высоких энергетических параметров двигателя показали перспективность применения в составе МТА и РБ.

Диссертация состоит введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 92 наименований. Общий объем диссертации составляет 150 страницы, включая 89 рисунков, 10 таблиц.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

29.12.2022

Во введении обоснована актуальность темы исследования, новизна и практическая значимость диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации Василевского Д.О. проведен обзор работ по безгазогенераторным ЖРД. Также в работе рассматриваются существующие отечественные и зарубежные схемные решения, реализуемые применительно к безгазогенераторной схеме питания ЖРД, основной целью которых является повышения УИТ и давления в КС. Автором работы проведена оценка используемых основных методов интенсификации теплообмена. Сформулирована постановка задачи, заключающаяся в разработке новой эффективной системы охлаждения безгазогенераторного ЖРД.

Во второй главе приведено описание математической модели процессов, происходящих в КС и тракте охлаждения ЖРД, на стационарном режиме работы двигателя в квазистатической постановке. Представленная математическая модель кислородно-водородного безгазогенераторного ЖРД содержит в себе уравнения одномерной газовой динамики, тепломассообмена, термодинамики, гидравлики, энергетических и геометрических параметров двигателя. Математическая модель содержит набор исходных данных и концептуально разбита на отдельные модули, в которых при «замороженных» геометрических параметрах ЖРД определяются основные физические параметры продуктов сгорания и охладителя. Также решаются задачи оптимального проектирования газодинамического профиля и оптимизации высокотеплонапряженных узлов конструкции корпуса двигателя по критериям максимального подогрева охладителя и минимизации гидравлических потерь.

В третьей главе рассматривается объект исследования – двигатель РД 0146, проведено описание характерной пневмогидравлической схемы двигателя. Описаны характерные особенности рассматриваемого двигателя.

В четвертой главе проводится расчётное исследование по максимальному увеличению подогрева охладителя. Приведен анализ

увеличения давления в КС и оценивается УИТ двигателя при фиксированном диапазоне давлений в КС. Показано, что с применением внутреннего оребрения возможно увеличить подогрев охладителя и давление в КС до 10,5 МПа, при этом за счёт увеличения степени расширения при фиксированных параметрах двигателя (тяга, коэффициент избытка окислителя и давление на срезе сопла) возможно увеличить УИТ до 468 с. С использованием математической модели показаны зависимости изменения высоты внутреннего оребрения и их влияние на тепловое состояние конструкции системы охлаждения и теплогидравлические параметры охладителя. Автором было получено, что оптимальная высота внутреннего оребрения при давлении в КС 10,5 МПа находится в диапазоне от 2 до 2,8 мм.

В пятой главе проводится верификация разработанной математической модели. Сначала проводится верификация по осуществлению подогрева горючего в межрубашечном пространстве двигателя РД-0146 с петлевой схемой охлаждения. Расчётные результаты верификации показали не более 2 % погрешности. Затем автором проводится дополнительная верификация для двигателей SSME 40К с водородным и водяным регенеративным охлаждением. Проводится сопоставление прогнозируемых расчётных величин удельных тепловых потоков с экспериментальными тепловыми потоками, измеренными калориметрическим методом. Данные, полученные в цилиндрической части камеры, показывают удовлетворительную сходимость, и далее вдоль профиля сопла плотности теплового потока показывают хорошую сходимость с экспериментальными данными.

В заключении приведены основные результаты, выносимые на защиту.

Приведенное в разделах диссертации результаты полностью соответствуют научным положениям, выносим на защиту.

Практическая ценность результатов работы заключается в том, что разработанная математическая модель и программа позволит: уменьшить время при проектировании безгазогенераторного ЖРД; оценить возможные варианты увеличения УИТ; спрогнозировать величины тепловых потоков, тепловое

состояние корпуса камеры, выбрать оптимальную схему охлаждения при проектировании и разработке двигателя.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается использованием известных методов исследований и научных положений, а также определением основных параметров двигателя, основанных на теории ЖРД, теплотехники и хладотехники, на фундаментальных положениях термодинамики, газовой динамики и гидравлики.

Научная новизна проведенных исследований

1. Разработана оптимизационная математическая модель для моделирования рабочих процессов и расчета критериев функционирования камеры двигателя и системы охлаждения кислородно-водородного безгазогенераторного ЖРД.
2. С использованием разработанной математической модели определено изменение удельного импульса тяги двигателя в зависимости от давления в КС при фиксированной тяге двигателя, коэффициента избытка окислителя и давления на срезе сопла.
3. Разработана методика и программа для проведения многовариантных расчётов с целью оптимизации элементов конструкции кислородно-водородного безгазогенераторного ЖРД.
4. Получена оценка влияния параметров внутреннего оребрения на тепловое состояние и параметры охладителя в тракте охлаждения камеры.
5. На основании полученных зависимостей обоснована возможность увеличения давления в КС и УИТ двигателя.

При рассмотрении диссертационной работы считаю необходимым обратить внимание на следующие **замечания**:

1. В тексте диссертации встречаются опечатки, стилистические неточности, например, на странице 49 в п. 1.4 можно увидеть опечатку

"недостатки" вместо "недостатки". Или на стр. 96 в первом предложении написано "плозادي" вместо "площади" и т.п.

2. В формуле 2.26 опечатка

3. В формулах 2.73, 2.93 и т.д. не приводится конкретный вид зависимости $\rho_{\text{охл}}(T,p)$.

4. Давление лучше обозначать строчной буквой p , чтобы не путать с тягой (см. формулу 2.7 на стр. 55)

5. Из текста диссертации неясно, сохраняются ли те же самые расчетные соотношения для конвективного теплообмена продуктов сгорания с "огневой" стенкой при наличии на ней внутренних "газовых" ребер.

6. Неясен физический смысл вертикальных участков на графике изменения температур стенки (рис. 4.27). Аналогично, характер зависимости температуры внутренних ребер по их длине, приведенной на рис. 4.52, также нуждается в пояснении. Видимо, здесь надо учитывать процессы теплопроводности в материале стенки в осевом направлении.

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Формулировка основных результатов и выводов логически следует из содержания диссертационной работы. Диссертация написана технически грамотным языком и является законченной научно-технической квалификационной работой. Личный вклад автора обоснован и подтвержден. Содержание автореферата полностью отражает основные положения, изложенные в диссертации. Основное содержание и результаты диссертационной работы представлены в четырех публикациях, четыре из которых – в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ.

Заключение

Считаю, что диссертационная работа «Способ увеличения удельного импульса тяги за счёт интенсификации теплообмена в системе охлаждения камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя» соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждении ученых степеней», предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор – Василевский Дмитрий Олегович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки).

Официальный оппонент,
профессор кафедры нефтегазового оборудования
и транспортировки Воронежского государственного
технического университета,
доктор технических наук,
профессор



Крети́нин Алекса́ндр Вале́нтинович

Подпись официального оппонента заверяю.

Первый проректор-
проректор по науке ВГТУ
МП



Дроздов И.Г.

"23" 12 2022 г.

394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования "Воронежский государственный технический
университет" (ВГТУ)

Телефон: 8 (473) 252-34-52

E-mail: avk-vrn@mail.ru

С отзывом ознакомлен 10.01.2023 (подпись)