

На правах рукописи



Бемяков Владислав Альбертович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
БЕЗГАЗОГЕНЕРАТОРНЫХ КИСЛОРОДНО-ВОДОРОДНЫХ
ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2022

Работа выполнена на кафедре «Ракетные двигатели» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

**Научный
руководитель:**

Мартиросов Давид Суренович
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

**Официальные
оппоненты:**

Кретинин Александр Валентинович
доктор технических наук, профессор, федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Воронежский
государственный технический университет»,
профессор кафедры «Нефтегазового
оборудования и транспортировки»

Мосолов Сергей Владимирович
кандидат физико-математических наук,
Государственный научный центр Российской
Федерации «Исследовательский центр имени М.В.
Келдыша», начальник отделения жидкостных
ракетных двигателей

**Ведущая
организация:**

Федеральное казенное предприятие «Научно-
испытательный центр ракетно-космической
промышленности»

Защита диссертации состоится **28 декабря 2022 г.** в **13 часов 00 минут** на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»:

https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=168799.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.327.06
доктор технических наук, доцент



Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время одной из главных задач в космической отрасли является модернизация межорбитального транспортного аппарата (МТА) или по-другому межорбитального буксира (МБ), служащего для доставки полезного груза на геосинхронную орбиту с дальнейшим возвращением на низкую околоземную орбиту, а также для выведения космических кораблей на межпланетные орбиты. Для решения задач по выведению космического аппарата (КА) на данные орбиты необходимо:

- разработать агрегаты и системы МБ с минимальной сухой массой;
- осуществление плавного на геосинхронную орбиту крупногабаритных космических объектов;
- возможность быстрой доставки грузов на геосинхронную орбиту.

За счет высокой стоимости выведения КА на орбиты, исследуется вопрос о возможности многократного использования (МИ) МТА. Решение данной задачи возможно при использовании безгазогенераторной схемы ЖРДУ (жидкостная ракетная двигательная установка). Она имеет ряд преимуществ по сравнению с другими существующими схемами питания двигателя:

- высокая экономичность, обусловленная использованием для привода насосов предкамерных турбин;
- отсутствие потерь удельного импульса тяги (УИТ) на завесное охлаждение за счет использования только регенеративного проточного охлаждения;
- повышенная надежность и упрощенная конструкция, обусловленные отсутствием газогенератора;
- минимальная сухая масса агрегатов и систем МТА.

Существующие проекты безгазогенераторных ЖРД (жидкостный ракетный двигатель), разрабатываемые в США, России, ЕС и Японии

показывают, что безгазогенераторная схема является перспективной для ее использования в ракетных двигателях для МТА.

Безгазогенераторные ЖРД работают только на криогенных компонентах топлива (кислород, водород, метан), продукты сгорания которых обеспечивают высокий УИТ двигателя: $I_{уд} = 465...475$ с. Достижение такого уровня УИТ возможно за счет применения более длинных сопел с большой степенью расширения (применение неохлаждаемых сопловых насадков), а также при помощи увеличения давления в КС путем интенсификации теплообмена в тракте охлаждения (ТО).

В ЖРД безгазогенераторной схемы привод турбин турбонасосных агрегатов (ТНА) осуществляется подогретым горючим в ТО. При этом используется только регенеративное проточное охлаждение корпуса КС компонентом топлива (горючим или окислителем), обеспечивающее надежный теплосъем с огневой стенки. После охлаждения двигателя компонент подается на привод турбины ТНА. За счет такой схема подачи топлива, а также его эффективной работоспособности, возможно обеспечить высокие значения адиабатной работы турбины, а, следовательно, и ее мощности.

В зависимости от технических требований к МТА и траектории полета, безгазогенераторная схема ЖРДУ в составе МТА позволяет осуществить выведение полезных грузов с той или иной орбиты благодаря высокому УИТ двигателя, а также возможности многократного включения. Достижение более высоких энергетических параметров двигателя, таких как тяга, УИТ и давление в КС, возможно за счет:

- интенсификации теплообмена в ТО;
- оптимизации конструкции рубашки охлаждения (варьирование геометрических параметров ребер и стенок);
- схемы охлаждения корпуса КС (наличие перепускных каналов, прямоточная и противоточная схема);

– применения комбинированного охлаждения с последующим использованием подогретого газа в качестве рабочего тела для привода турбины ТНА;

- схемы ТНА (одновальная, отдельная или с редуктором);
- проектирования агрегатов ТНА и БТНА с высоким КПД;
- новых схемных решений двигателя (применение сторонних источников тепла для дополнительного подогрева рабочего тела турбины ТНА).

Учитывая современные тактико-технические требования к ЖРД по уровню тяг, давлений в КС и УИТ, а также особенности безгазогенераторной схемы, необходимо рассмотреть способы повышения энергетических параметров ЖРД безгазогенераторной схемы, а также разработать математическую модель для определения основных параметров двигателя, учитывающую влияние различных факторов на давление в КС и УИТ. Использование данной модели позволит определить оптимальные параметры ЖРД и его агрегатов в границах изменения основных параметров (давление в КС, тяга, УИТ) исследуемого двигателя, выявить перспективную схему двигателя в условиях поставленной задачи, а также наиболее эффективно оценить реализуемость задач по выведению полезного груза с околоземной орбиты на целевые орбиты и на различные траектории к другим планетам.

Объектом исследования являются кислородно-водородный ЖРД безгазогенераторной схемы и рабочие процессы, протекающие в нем.

Целью работы являются повышение энергетических характеристик безгазогенераторного кислородно-водородного ЖРД (давление в КС и УИТ двигателя) и выбор перспективной схемы двигателя при фиксированной тяги и соотношении компонентов.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Разработана математическая модель безгазогенераторного кислородно-водородного ЖРД, описывающая его квазистатические рабочие процессы.

2. Разработана методика расчета и программно-математическое обеспечение расчета параметров ЖРД и его агрегатов, позволяющие проводить варианты расчеты энергетических параметров двигателя.

3. Выявлены схемные решения двигателя, обеспечивающие его высокие энергетические параметры в диапазоне изменения давления в КС.

4. Получена оценка влияния:

- интенсификации теплообмена в ТО на энергетические параметры двигателя;

- параметров агрегатов ТНА и БТНА на энергетическую увязку двигателя безгазогенераторной схемы;

- изменения энтальпии компонентов топлива на энергетические параметры двигателя.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель кислородно-водородного ЖРД, выполненного по безгазогенераторной схеме, описывающая квазистатические рабочие процессы.

2. С использованием разработанной математической модели ЖРД безгазогенераторной схемы получены границы изменения удельного импульса тяги двигателя в зависимости от давления в КС при фиксированной тяги двигателя и соотношении компонентов топлива, на основании которых разработаны схемы безгазогенераторного ЖРД, обеспечивающие оптимальные значения удельного импульса тяги, давления в КС, энергетических характеристик основных и бустерных турбонасосных агрегатов (ТНА и БТНА) с учетом теплового состояния КС.

3. Разработана методика и программно-математическое обеспечение расчета параметров рабочих процессов кислородно-водородного ЖРД безгазогенераторной схемы, обеспечивающие проведение вариантов расчетов энергетических параметров двигателя.

4. Предложены способы повышения энергетических параметров безгазогенераторного ЖРД за счет увеличения температуры подогрева

компонента топлива в охлаждающем тракте камеры с учетом влияния изменения энтальпии топлива.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанная математическая модель и методика расчета позволяют:

1. Определить границы изменения удельного импульса тяги двигателя и давления в КС с учетом энергетического баланса ТНА и БТНА двигателя и температурного состояния камеры.

2. Определить основные проектные параметры двигателя и его агрегатов для ряда исходных данных.

3. Получить оптимальные энергетические параметры ЖРД в диапазоне изменения давления в КС при фиксированной тяге и соотношении компонентов топлива.

4. Выбрать оптимальную схему двигателя.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель безгазогенераторного кислородно-водородного ЖРД, описывающая его квазистатические рабочие процессы;

2. Результаты расчетов параметров двигателя, полученные с помощью разработанной математической модели.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается:

1. Использованием известных методов исследований и научных положений.

2. Определением основных параметров ЖРД и его агрегатов, основанного на общих закономерностях теории жидкостных ракетных двигателей, лопаточных машин и теплотехники.

3. Использованием фундаментальных положений гидравлики, газовой динамики, термодинамики и теплофизики.

4. Согласованием результатов расчетов по разработанной математической модели подтверждаются данными, опубликованными в открытой печати.

Основным вкладом соискателя является разработанная автором математическая модель, методика и программно-математическое обеспечение расчетов параметров безгазогенераторного кислородно-водородного ЖРД по критерию обеспечения оптимального УИТ двигателя. При помощи разработанной модели определены границы изменения УИТ двигателя в зависимости от давления в КС при фиксированной тяги и соотношении компонентов, получены геометрические и энергетические параметры двигателя и его агрегатов, выявлены перспективные схемные решения ЖРД и предложены способы повышения энергетических параметров ЖРД.

Апробация и внедрение результатов исследований

Основные результаты работы были представлены на конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики», (Москва, 2016 г.); XV, XVI, XIX Международных конференциях «Авиация и космонавтика» (Москва, 2016, 2017, 2020 гг.); II Международном православном студенческом форуме (г. Москва, 2016 г.); Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения (г. Самара, 2016 г.); III Международной конференции «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (г. Красноярск, 2017 г.), Международной молодежной научной конференции «XXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (г. Казань, 2017 г.); XLII-XLIV, XLVII и XLVIII Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, 2016-2018, 2021, 2022 гг.).

Опубликованные работы

Основные результаты работы изложены в 4 публикациях в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России.

Структура и объем работы

Работа представляет собой рукопись объемом 139 страниц печатного текста, состоящего из 5х глав, включает 52 иллюстрации, 16 таблиц, список используемых источников, содержащий 113 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и новизна темы диссертационного исследования, формулируются цель работы и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, сообщаются сведения об апробации работы и публикациях автора, излагаются объем и структура диссертации.

В первой главе проводится аналитический обзор литературных источников по исследованию отечественных и зарубежных кислородно-водородных ЖРД, приводятся особенности и назначение двигателей безгазогенераторной схемы. Отмечается, что такая схема ЖРД нашла применение в качестве маршевого двигателя для разгонных блоков, а также для третьих ступеней ракет-носителей.

Выявлено, что наибольший УИТ двигателя для верхних ступеней РН и РБ соответствует ЖРД, выполненным по закрытой безгазогенераторной схеме. При этом тяга таких двигателей составляет 7...20 т при давлении в КС до 10 МПа. Более высокий УИТ достигается за счет применения выдвигаемых неохлаждаемых сопловых насадков, т.е. за счет увеличения степени расширения сопла, повышения давления в КС, а также высокого КПД агрегатов основных ТНА двигателя. Для безгазогенераторных ЖРД увеличение УИТ возможно за счет интенсификации теплообмена в ТО КС топлива, служащего рабочим телом турбин. Данный метод позволяет обеспечить более высокую мощность турбин основных ТНА, а также увеличить энтальпию топлива, приходящего в КС

На основании проведенного анализа выбрана схема двигателя-прототипа безгазогенераторного кислородно-водородного ЖРД РД-0146, приведенная на рисунке 1.

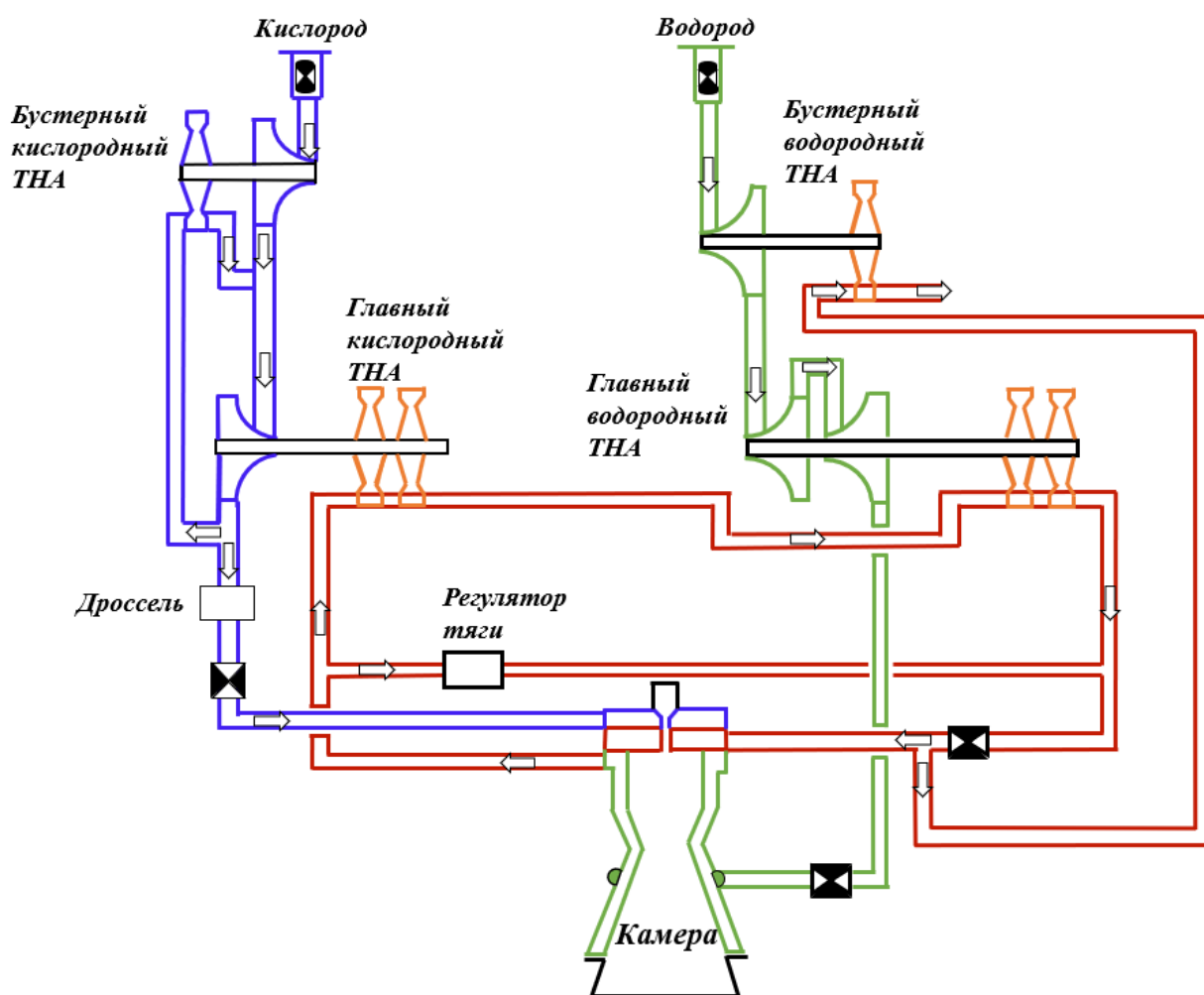


Рисунок 1– Пневмогидравлическая схема рассматриваемого безгазогенераторного кислородно-водородного ЖРД

Во второй главе приводится методика расчета параметров безгазогенераторного кислородно-водородного ЖРД на основе разработанной математической модели двигателя, описывающей его квазистатические рабочие процессы. Структурно-функциональная блок-схема разработанной математической модели показана на рисунке 2. Модель реализована на языке программирования Python, который позволяет создать программу, удовлетворяющую требованиям простоты, доступности, адаптивности и экономичности.



Рисунок 2– структурно-функциональная блок-схема квазистатической модели

В основу модели положены уравнения гидравлики, термодинамики, теплозащиты и охлаждения корпуса камеры ЖРД, газовой динамики, тепломассообмена, расчета ЖРД, а также агрегатов ТНА и БТНА и их характеристик.

Целью создания разработанной математической модели является минимизация затрат времени для получения высоких энергетических параметров ЖРД и поиска перспективных схем двигателя. Для этого задаются следующие исходные данные:

- схема двигателя
- тяга двигателя P ;
- соотношение компонентов топлива k_m ;
- давление в КС $p_{КС}$;
- температура топлива $T_{вх}$;
- давление на входе в бустерные насосы окислителя и горючего $p_{16н}$.

Рассчитываются энергетические и геометрические параметры ЖРД и агрегатов ТНА и БТНА. Определяется оптимальная температура подогрева водорода в ТО, обеспечивающая надежное охлаждение корпуса КС,

энергетический баланс ТНАО и ТНАГ для заданного давления в КС и УИТ двигателя.

Математическая модель позволяет провести анализ параметров двигателя в рабочем диапазоне изменения давлений в КС (с заданной тягой и соотношением компонентов топлива) для поиска предельных параметров схемы двигателя с учетом ограничений на реализуемость. При этом возможен выбор перспективной схемы двигателя в зависимости от тактико-технических требований.

Модель включает в себя модуль исходных данных и модули расчета по частным инженерным методикам и математическим моделям, которые располагаются на разных уровнях процесса проектирования ЖРД. Методики включают в себя последовательный итерационный расчет геометрических и энергетических параметров ЖРД и его агрегатов, нахождение оптимальных параметров ЖРД по критерию обеспечения высокого УИТ двигателя.

Конечным результатом работы модели является множество решений по УИТ двигателя, которые проверяются на реализуемость. Проверку на реализуемость осуществляет программа путем расчета условия выполнения баланса мощностей агрегатов ТНА и БТНА и обеспечения надежного охлаждения корпуса КС двигателя. Если условие по охлаждению КС не выполняются, то производится расчет параметров схемы двигателя при теоретической температуре рабочего тела турбин ТНАО и ТНАГ (под этим понимается, если подводить дополнительную тепловую энергию к горючему с помощью других источников тепла).

В третьей главе приводится описание программно-математического обеспечения проведения расчетов. Разработанная программа расчета параметров кислородно-водородного безгазогенераторного ЖРД состоит из ряда программных модулей:

- модуль исходные данные;
- модуль расчета параметров двигателя на номинальном режиме работы;

- модуль расчета параметров двигателя в рабочем диапазоне изменения давления в КС;
- модуль вывода результатов расчетов и их анализ;
- вспомогательные модули.

Модули непосредственно связаны между собой в виде многоуровневой архитектуры. В них используются «классы» с возможностью множественного наследования.

В модулях содержатся универсальные функции, описывающие формулы, алгоритмы и различные методы для расчета и проектирования ЖРД и его агрегатов. Функции распределены по соответствующим «классам», организованным при помощи многоуровневого наследования, которое позволяет объединить их в логическую группу данных в виде «класса» и «супер-класса».

В четвертой главе проводится расчетное исследование безгазогенераторного кислородно-водородного ЖРД. Были произведены расчеты безгазогенераторного кислородно-водородного ЖРД на номинальном режиме работы двигателя. Полученные результаты расчетов показали хорошее совпадение с параметрами двигателя РД-0146, опубликованными в открытой печати.

Решена задача по обеспечению максимального УИТ двигателя с учетом теплового состояния камеры и мощностного баланса агрегатов ТНАО и ТНАГ. В результате получена зависимость изменения температуры горючего на выходе из ТО от давления в КС при различном числе оборотов ротора ТНАГ. Данная зависимость, приведенная на рисунке 3, описывает достижение энергетической увязки схемы двигателя с учетом подогрева охладителя в рубашке охлаждения

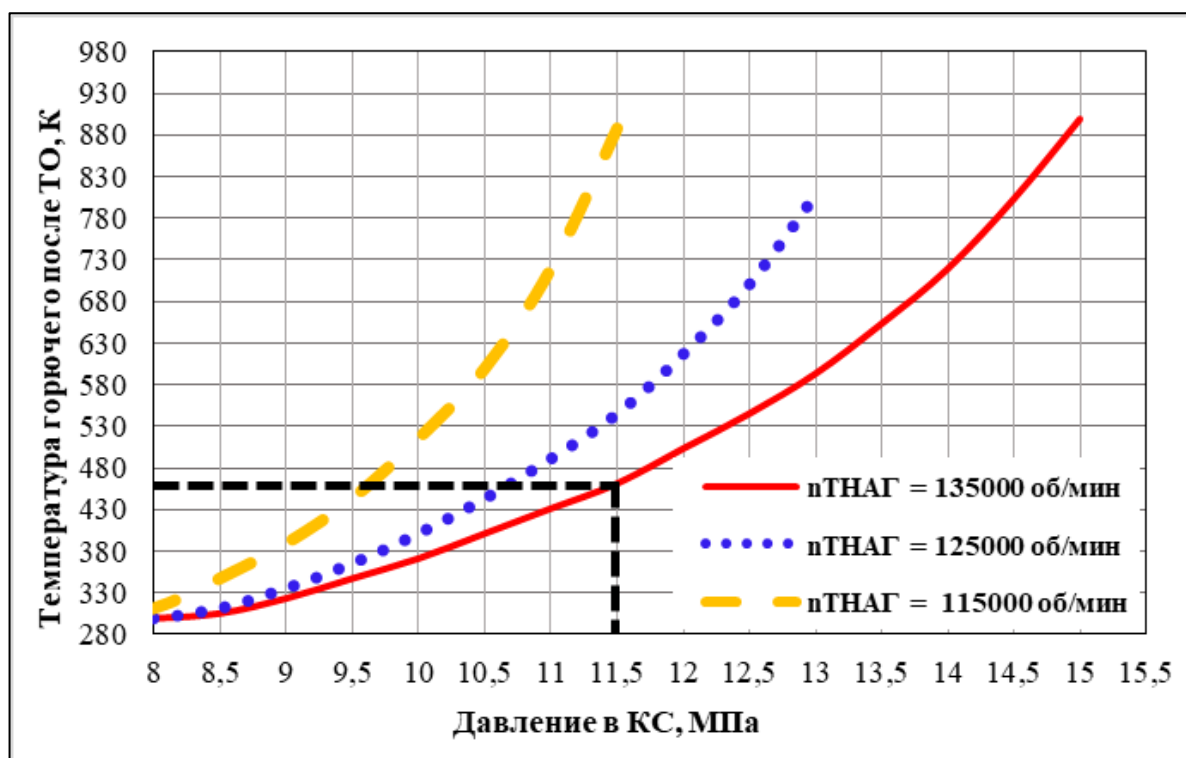


Рисунок 3 – Зависимость температуры водорода после ТО от давления в КС и числа оборотов ротора ТНАГ

Пунктирной линией на рисунке 3 обозначены границы по максимально возможному подогреву водорода в ТО в зависимости от давления в КС и числа оборотов ротора ТНАГ. Ограничение по температуре $T_{2,то}$ объясняется высокой температурой газовых ребер, установленных на огневой стенке камеры. При этом их температура составила $T_p = 950...1050 K$. Использование дополнительных ребер на огневой стенке камеры позволяет значительно увеличить степень интенсификации теплообмена в ТО и обеспечить температуру $T_{2,то}$ до 460 K. При этом возможно повысить давление в КС до 11,5 МПа при оборотах ротора ТНАГ $n_{ТНАГ} = 135000 об/мин$ или до 10,5 МПа при $n_{ТНАГ} = 125000 об/мин$.

Данные, представленные на рисунке 3 для $p_{КС} > 11,5 МПа$ достижимы за счет подвода дополнительного тепла к горячему с помощью:

- установки в КС трубки Фильда, в которой хладагент после ТО дополнительно подогревается и после направляется на привод турбины ТНАО (например, как это реализовано в двигателе HIREX);

- применения теплообменного аппарата, установленного перед входом горючего в ТО (например, как в двигателе АЕСЕ);
- использования теплообменного аппарата в составе восстановительного ГГ, служащего для дополнительного подогрева горючего в нем (при этом ГГ не участвует в схеме питания двигателя).

Была получена оценка влияния изменения полной энтальпии топлива на энергетические параметры камеры. На рисунке 4 приведена зависимость изменения температуры продуктов сгорания $T_{\text{КС}}$ от давления в КС $p_{\text{КС}}$ с учетом и без пересчета энтальпии топлива к условиям подачи.

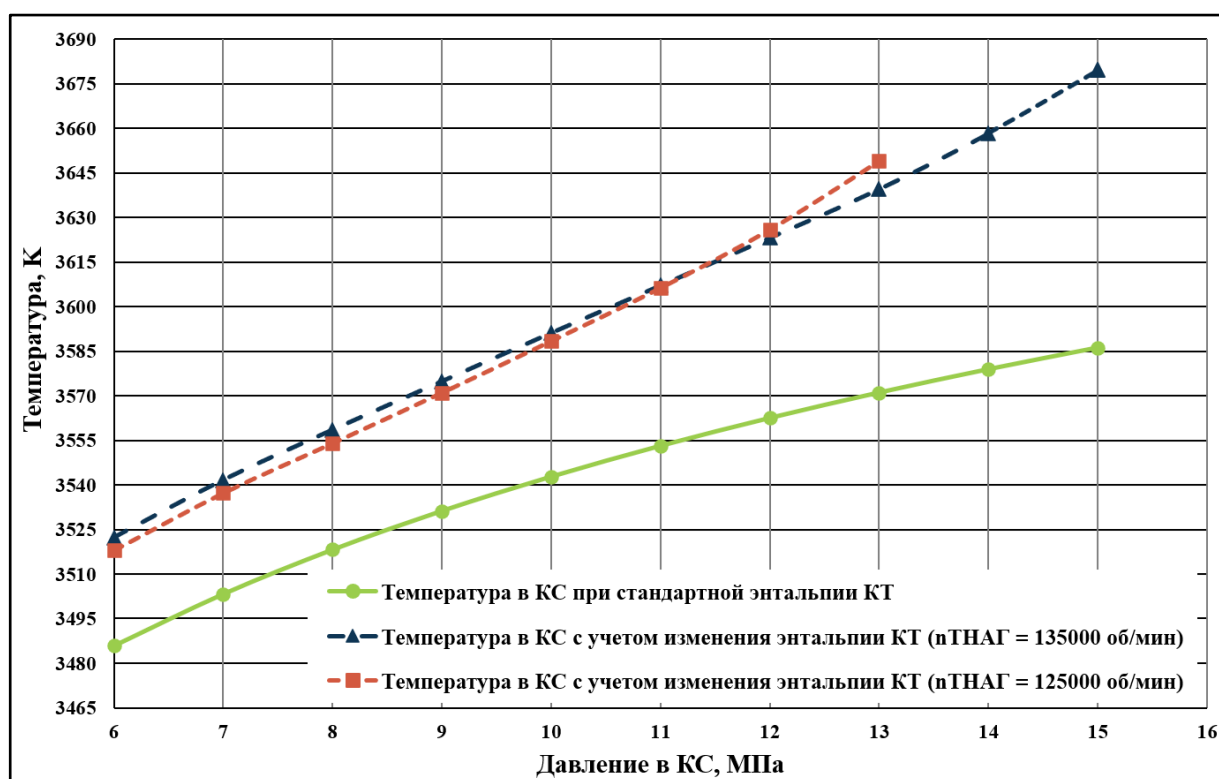


Рисунок 4 – Зависимость температуры продуктов сгорания в КС от давления в КС с учетом изменения энтальпии компонентов топлива

Выявлено, что изменение теплофизических свойств топлива в значительной мере влияет на температуру продуктов сгорания в КС. При этом разница по температуре $T_{\text{КС}}$ увеличивается с ростом давления $p_{\text{КС}}$.

Также получено, что с ростом давления в КС потребный расход на привод турбин БТНАО и БТНАГ уменьшается. Учитывая время работы двигателя, равное 560 с, то при давлении в КС $p_{\text{КС}} = 11,5 \text{ МПа}$ массу окислителя в баке возможно снизить (относительно (относительно $p_{\text{КС}} = 8 \text{ МПа}$) на 764 кг,

а массу горючего на 31,7 кг или уменьшить потерю водорода на 23 кг в случае сброса турбогаза за борт.

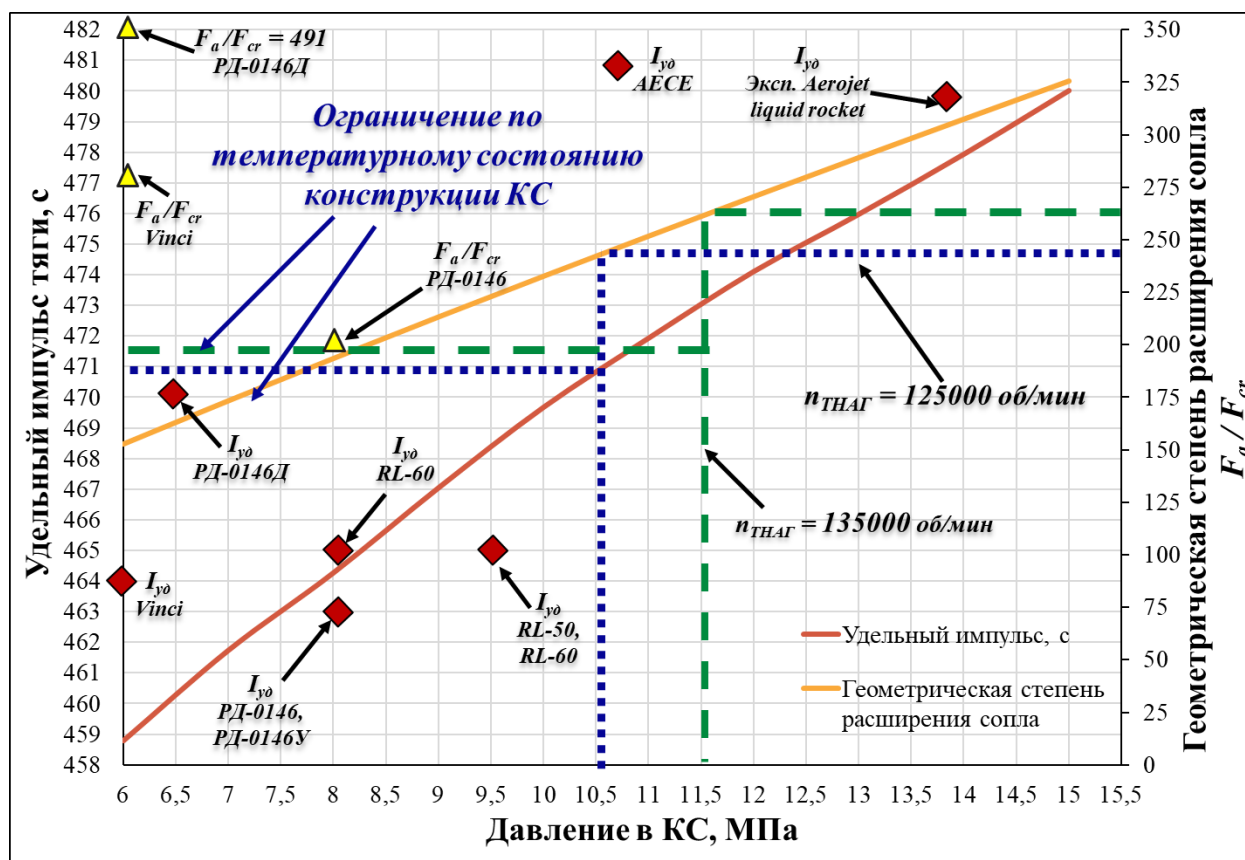


Рисунок 5. Зависимость УИТ и геометрической степени расширения сопла безгазогенераторного ЖРД от давления в КС

В результате оптимизации параметров безгазогенераторного ЖРД выявлено, что максимальный УИТ двигателя, согласно рисунку 5, составляет $I_{уд} = 473$ с при следующих параметрах:

- давление в КС $p_k = 11,5$ МПа;
- число оборотов ротора ТНАГ $n_{ТНАГ} = 135000$ об/мин;
- геометрическая степени расширения сопла $\varepsilon_a = 260$.

В пятой главе приводятся рекомендации по схемным решениям рассматриваемого безгазогенераторного кислородно-водородного ЖРД.

Выявлено, что при давлении в КС $p_k \leq 8$ МПа и числе оборотов ротора ТНАГ $n_{ТНАГ} \leq 115000$ об/мин штатная схема двигателя, приведенная на рисунке 1, удовлетворяет требованиям по обеспечению необходимого УИТ $I_{уд} =$ до 463 с. Необходимо отметить, что полученные результаты показывают хорошее совпадение рассчитанных параметров рассматриваемого двигателя с

параметрами ЖРД РД-0146, опубликованными в открытой печати. Это позволяет сделать вывод о том, что другие результаты (при другом давлении в КС, оборотах ротора ТНАГ и т.д.), полученные по математической модели и не имеющие экспериментального подтверждения, также заслуживают доверия.

Увеличение оборотов ротора ТНАГ до $n_{\text{ТНАГ}} \leq 125000$ об/мин позволяет использовать более выгодную схему (смотри рисунок 6) с дополнительным перепуском водорода за турбину ТНАГ. Данная схема обеспечивает УИТ двигателя $I_{\text{уд}} =$ до 467 с при давлении в КС $p_{\text{к}} \leq 9$ МПа. Наличие дополнительного перепуска турбогаза со входа в ТНАГ на вход в смесительную головку КС объясняется избыточной мощностью турбины. Поэтому схема, представленная на рисунке 6 и, согласно зависимостям на рисунке 3, более выгодна, если:

- температура водорода после ТО менее $T_{\text{вых.то}} < 350$ К при оборотах ротора ТНАГ $n_{\text{ТНАГ}} \leq 115000$ об/мин;
- температура водорода после ТО менее $T_{\text{вых.то}} < 315$ К при оборотах ротора ТНАГ 115000 об/мин $< n_{\text{ТНАГ}} \leq 125000$ об/мин.

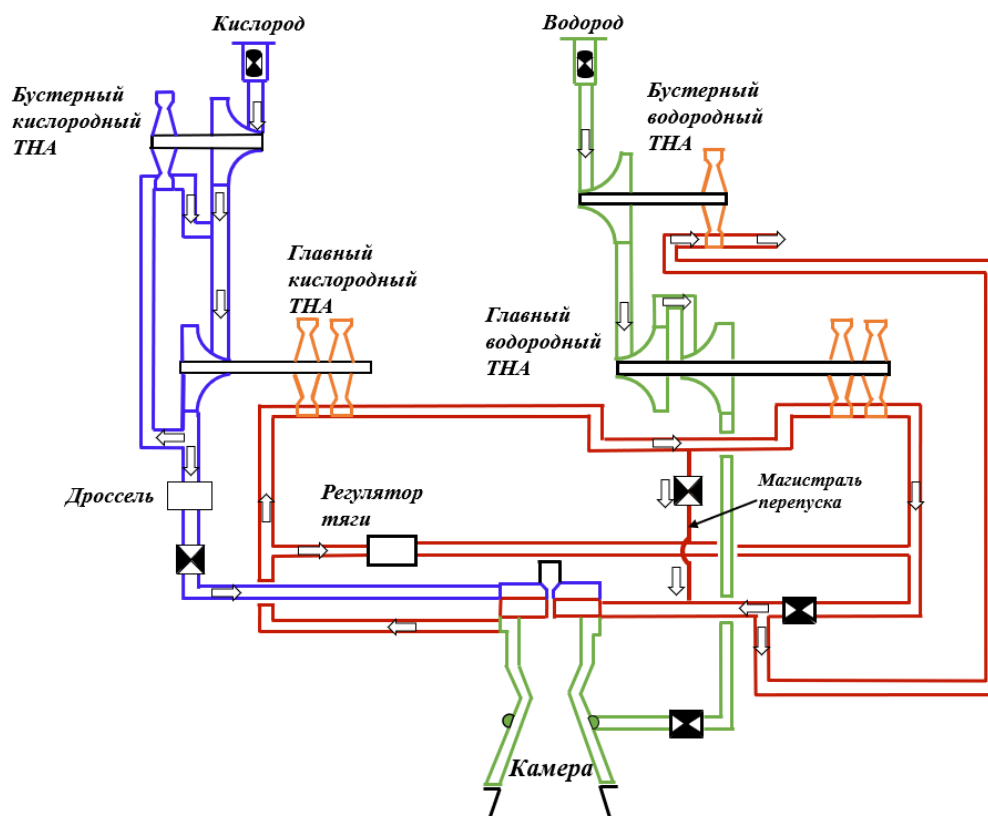


Рисунок 6 – Схема безгазогенераторного ЖРД с дополнительным отбором турбогаза со входа в ТНАГ на вход в смесительную головку КС

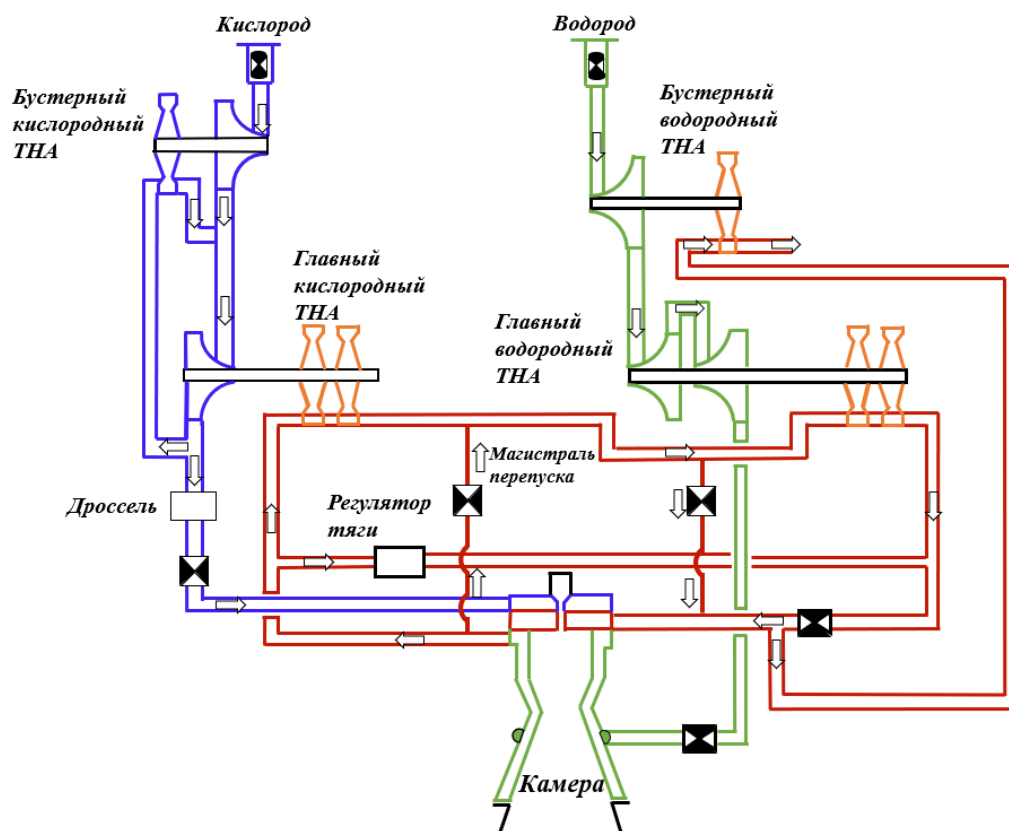


Рисунок 7 – Схема безгазогенераторного ЖРД с дополнительным отбором турбогаза с выхода из тракта охлаждения (или со входа в ТНАГ) на вход в ТНАГ (или на вход в смесительную головку КС)

Достижение более высокого давления в КС $p_k > 9$ МПа реализуется схемой, приведенной на рисунке 7. В зависимости от числа оборотов ротора ТНАГ, давления в КС и температуры рабочего тела турбины, водород после ТНАО отбирается со входа в ТНАГ на вход в смесительную головку КС, либо отбирается после ТО на вход в ТНАГ.

При оборотах ротора $n_{\text{ТНАГ}} > 125000$ об/мин и давления в КС $8,5 \text{ МПа} < p_k \leq 10,5 \text{ МПа}$ мощность турбины ТНАГ может оказаться избыточной в связи с лишним подогревом водорода в ТО $T_{\text{вых.то}} = 300 \dots 400 \text{ К}$. Но при дальнейшем увеличении давления в КС $p_k > 10,5 \text{ МПа}$ достижение энергетического баланса агрегатов ТНАГ осуществляется путем добавления небольшого количества водорода через перепускную магистраль, установленную между выходом из ТО и турбины ТНАО, как указано на рисунке 7.

В заключении сформулированы следующие основные результаты по диссертационной работе:

1. Разработана математическая модель безгазогенераторного кислородно-водородного ЖРД, описывающая его квазистатические рабочие процессы и позволяющая проводить проектно-исследовательские работы в области расчета и проектирования двигателя.

2. Разработана методика расчета и программно-математическое обеспечение расчета параметров ЖРД, реализованное на языке программирования Python и позволяющие проводить вариантыные расчеты для определения границ изменения удельного импульса тяги и давления в КС с учетом энергетического баланса агрегатов ТНА и БТНА, теплового состояния конструкции камеры и влияния изменения энтальпии топлива на энергетические параметры двигателя.

3. Предложены способы достижения высоких энергетических параметров безгазогенераторного ЖРД (давление в КС и удельный импульс тяги двигателя) на номинальном режиме работы двигателя и в рабочем диапазоне изменения давления в КС.

4. При помощи разработанной математической модели получены критерии по обеспечению высоких энергетических параметров двигателя в диапазоне изменения давления в КС (от 6 до 11,5 МПа), обуславливаемые степенью интенсификации теплообмена в рубашке охлаждения, геометрическими параметрами камеры, тепловым состоянием конструкции КС и энергетическими параметрами агрегатов ТНАО и ТНАГ.

5. Предложены схемные решения ЖРД тягой 10 тс, обеспечивающие удельный импульс тяги двигателя 467-473 с:

– для давления в КС от 6 до 9 МПа рекомендована схема с отбором турбогаза (помимо отбора на регулятор тяги) со входа в ТНАГ на вход в смесительную головку КС, при этом удельный импульс тяги двигателя составляет 460-468 с;

– достижение более высокого давления в КС возможно при использовании схемы с дополнительным отбором турбогаза (помимо отбора со входа в ТНАГ на вход в смесительную головку камеры при давлении в КС менее 9 МПа) с выхода из тракта охлаждения на вход в ТНАГ (при давлении в КС более 9 МПа); при этом данная схема обеспечивает давление в КС до 11,5 МПа, а удельный импульс тяги двигателя равен 473 с.

6. Получено, что за счет изменения суммарного расхода топлива в КС, а также потребного расхода для привода турбин БТНАО и БТНАГ, при давлении в КС 11,5 МПа массу окислителя в баке возможно снизить (относительно давления в КС 8 МПа) на 764 кг, а массу горючего на 31,7 кг или уменьшить потерю водорода на 23 кг в случае сброса турбогаза за борт.

7. Дальнейшее увеличение энергетических параметров кислородно-водородного безгазогенераторного ЖРД возможно за счет подвода дополнительного тепла к горючему с помощью:

– применения теплообменного аппарата, установленного перед входом в тракт охлаждения двигателя или в составе восстановительного газогенератора;

– трубки Фильда, введенной в КС.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях:

1. Беляков В.А., Василевский Д.О. Перспективные схемные решения безгазогенераторных двигателей // Вестник ПНИПУ Аэрокосмическая техника. 2019 №58 С.69-86. Doi: 10.15593/2224-9982/2019.58.06.
2. Беляков В.А., Василевский Д.О., Ермашкевич А.А., Коломенцев А.И., Фаризанов И.Р. Развитие концепции многоцветного жидкостного ракетного двигателя на трехкомпонентном топливе // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, №1. С 121-136. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-121-136.

3. Беляков В.А., Василевский Д.О., Ермашкевич А.А., Коломенцев А.И., Фаризанов И.Р. Проектирование системы охлаждения многоразового ракетного двигателя на трёхкомпонентном топливе // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, №2. С 316-327. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-316-327.
4. Беляков В.А. Выбор энергетических параметров кислородно-водородного безгазогенераторного жидкостного ракетного двигателя / Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 3.