

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**Кренина Александра Валентиновича**

на диссертационную работу

Белякова Владислава Альбертовича

«Повышение энергетических характеристик безгазогенераторных кислородно-водородных жидкостных ракетных двигателей»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки)

В диссертационной работе Белякова В.А. рассматриваются способы повышения энергетических параметров безгазогенераторного кислородно-водородного жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), а также выбор перспективной схемы двигателя при фиксированной тяги двигателя и соотношении компонентов топлива.

Задачи, заключающиеся в повышении энергетических параметров ЖРД, таких как тяга, давление в камере сгорания (КС) и удельный импульс тяги, являются **актуальными** для модернизации межорбитального транспортного аппарата (МТА), служащего для доставки полезного груза на геосинхронную орбиту, с возвращением на низкую околоземную орбиту, а также для выведения космических кораблей на межпланетные орбиты. Решение данных задач возможно за счет использования безгазогенераторной схемы ЖРД, которая имеет известные преимущества перед ЖРД с другими схемами питания.

Полный объем диссертации составляет 142 страницы и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включает 52 иллюстрации, 16 таблиц, а также одно приложение.

**В первой главе** диссертации Белякова В.А. проведен аналитический обзор работ по исследованию отечественных и зарубежных кислородно-водородных ЖРД, выполненных по открытым и закрытым схемам двигателя,

Служба документационного  
обеспечения МАИ

«12» 12 2022г.

среди которых наиболее перспективной для использования в составе МТА особенно отмечается безгазогенераторная схема. Приводятся ее назначение и особенности, заключающиеся в обеспечении высоких энергетических характеристик, таких как давление в КС и удельный импульс тяги (УИТ) двигателя. В работе проведен анализ по схемным решениям безгазогенераторного ЖРД, а также приведены способы обеспечения оптимальных значений давления в КС и УИТ при фиксированной тяге двигателя и соотношения компонентов топлива за счет интенсификации теплообмена в тракте охлаждения (ТО) и энергетических параметров основных и бустерных турбонасосных агрегатов (ТНА и БТНА).

**Во второй главе** представлена математическая модель кислородно-водородного безгазогенераторного ЖРД, описывающая квазистатические рабочие процессы двигателя. В основу математической модели положены уравнения термодинамики, гидравлики, газовой динамики, тепломассообмена, расчета ЖРД и его агрегатов. Модель включает в себя модуль исходных данных и модули расчета по частным инженерным методикам, располагающиеся на разных уровнях процесса проектирования ЖРД. Методики представлены в виде итерационного расчета геометрических и энергетических параметров ЖРД, ТНА и БТНА по критерию обеспечения оптимальных двигателя.

**В третьей главе** приведено описание программно-математического обеспечения расчетов, реализованного на языке программирования Python. Разработанная программа расчета состоит из ряда программных модулей, непосредственно связанных между собой.

**Четвертая глава** посвящена расчетному исследованию кислородно-водородного ЖРД, выполненного по безгазогенераторной схеме. При помощи разработанной математической модели Беляковым В.А. исследовано влияние подогрева охладителя в ТО и энергетических параметров агрегатов ТНА на энергетическую увязку двигателя. На основании полученных зависимостей автор выявил границы изменения УИТ двигателя в зависимости от давления в

КС и числа оборотов ротора турбонасосного агрегата горючего (ТНАГ). В работе также были исследованы различные конструкторские решения системы охлаждения камеры в целях увеличения интенсификации теплообмена в ТО. Было рассмотрено удлинение цилиндрической части КС и использование дополнительного оребрения на огневой стенке КС, позволяющие повысить температуру подогрева хладагента в ТО до 460 К. С учетом данных мероприятий, а также за счет поиска оптимальных оборотов ротора ТНАГ автором было получено, что оптимальное давление в КС составляет 11,5 МПа, за счет чего возможно повысить УИТ тяги двигателя до 473 с.

**В пятой главе** приводятся рекомендации по схемным решениям безгазогенераторного кислородно-водородного ЖРД. В зависимости от технических требований, предъявляемым к двигателю, автором разработана схема с дополнительным отбором турбогаза со входа в ТНАГ на вход в смесительную головку КС, обеспечивающая УИТ двигателя до 467 с при давлении в КС менее 9 МПа. Достижение более высокого давления в КС осуществимо за счет применения схемы двигателя с дополнительным отбором турбогаза с выхода из ТО на вход в ТНАГ, обеспечивающая УИТ до 473 с при давлении в КС более 9 МПа.

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 методика расчета позволяют определить основные проектные параметры безгазогенераторного ЖРД и его агрегатов для ряда исходных данных, выбрать схему двигателя, обеспечивающую оптимальные значения удельного импульса тяги, давления в КС и энергетических параметров ТНА и БТНА и подогрева компонента топлива в ТО камеры.

## **Степень достоверности результатов проведенных исследований**

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается использованием известных методов исследований и научных положений, а также определением геометрических и энергетических параметров двигателя и агрегатов ТНА и БТНА, основанных на теории ЖРД, лопаточных машин и теплотехники, на фундаментальных положениях термодинамики, газовой динамики и гидравлики.

## **Научная новизна проведенных исследований**

1. Автором диссертационной работы разработана математическая модель кислородно-водородного безгазогенераторного ЖРД, описывающая квазистатические рабочие процессы;

2. Разработана методика и программно-математическое обеспечение для проведения вариантных расчетов параметров кислородно-водородного ЖРД, выполненного по безгазогенераторной схеме;

3. С помощью разработанной математической модели кислородно-водородного безгазогенераторного ЖРД определены границы изменения удельного импульса тяги двигателя в зависимости от давления в КС и числа оборотов ТНА горючего. На основании полученных зависимостей автором предложены перспективные схемные решения кислородно-водородного безгазогенераторного ЖРД, обеспечивающие оптимальные значения удельного импульса тяги, давления в КС и энергетических характеристик ТНА и БТНА с учетом теплового состояния КС;

4. В диссертационной работе просчитаны способы повышения энергетических параметров кислородно-водородного безгазогенераторного ЖРД за счет интенсификации теплообмена в ТО с учетом влияния изменения энтальпии компонентов топлива.

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

1. В работе не представлены расчетные приведенные характеристики агрегатов ТНА и БТНА, полученные на номинальном режиме работы двигателя.

2. В диссертации отсутствует методика гидравлического расчета трубопроводов и элементов ПГС конкретного двигателя (РД0146), что затрудняет понимание результатов таблицы 2.2. В частности, как определяются коэффициенты гидравлических сопротивлений для конкретного двигателя, какие соотношения для расчета параметров, влияющих на гидравлические потери для газообразного водорода в ТО, используются и т.д?

3. Водород заправляется в бак несколько переохлажденным. При этом его стандартная энтальпия уменьшается. Из текста диссертации неясно, учитывается ли это? Не учитывается влияние на энтальпию водорода работы сжатия водорода в баке давлением наддува.

4. Процессы теплообмена в камере проходят при неравномерном распределении компонентов по форсункам, что приводит к отклонениям соотношения компонентов в пристеночном слое, а также при неравномерном распределении расхода по охлаждающим каналам ТО. Влияние этих неравномерностей не учитывается.

5. В диссертации и автореферате имеется некоторое количество стилистических, орфографических, пунктуационных погрешностей и опечаток.

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 «Повышение энергетических характеристик безгазогенераторных кислородно-водородных жидкостных ракетных двигателей» соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор – Беляков Владислав Альбертович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки).

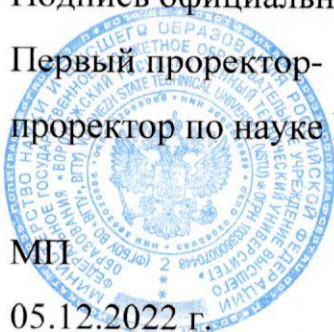
Официальный оппонент,  
профессор кафедры нефтегазового оборудования  
и транспортировки Воронежского государственного  
технического университета,  
доктор технических наук,  
профессор



Крети́нин Алекса́ндр Вале́нтинович

Подпись официального оппонента заверяю.

Первый проректор-  
проректор по науке ВГТУ



Дроздов И.Г.

МП  
05.12.2022 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 12.12.2022  
