**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**

**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | |  |  | ДОПУСКАЕТСЯ К ЗАЩИТЕ: | | | | | | | | | | | | | | |
| Факультет | А | |  | Заведующий кафедрой | | | | | |  | | | | А8 | | | | | | |
|  | индекс факультета | |  |  | | | | |  | | | | | | индекс кафедры | | |
| Выпускающая кафедра | А8 | |  | | Левихин А.А. | | |  | | | |  | | | | | | | |
|  | индекс кафедры | |  | | Фамилия ИО | |  | | | | подпись | | | | | | | | | | |
| Группа | А8М31 | |  | «\_\_\_\_\_» | |  | | | | | | | | | | 2017 г. | | |
|  | индекс группы | |  |  | |  | | | | | | |  | | | |

**отчет**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | **о научно-исследовательской работе** | | | | | | | |  |
| наименование практики | | | | | | | |
| Цыгановой Валерии Денисовны | | | | | | | |
| Фамилия, имя, отчество обучающегося | | | | | | | |
| **Обучающегося по**  **направлению/специальности** | | | 24.04.05 |  | | Двигатели летательных | | |
| нужное подчеркнуть | | | код | |  | | полное наименование направления/специальности |
| аппаратов | | | | | | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Руководитель НИР от БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова:** | | | |  | |  | |
|  | |  | |  | |  | |
| Подпись | |  | | Фамилия ИО | |  | |
| «\_\_\_» | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ |  | 2017г. | |  | |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2017 г.

**СОДЕРЖАНИЕ**

[ВВЕДЕНИЕ 3](#_Toc529996065)

[1. Постановка задачи 5](#_Toc529996066)

[2. Обзор литературы по исследуемому вопросу 6](#_Toc529996067)

[2.1. Проектирование КС и ГГ ЖРД 6](#_Toc529996068)

[2.2. Проектирование парогазогенераторов ДДА 9](#_Toc529996069)

[2.3. Компьютерное математическое моделирование 11](#_Toc529996070)

[3. Выбор метода математического моделирования 13](#_Toc529996071)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 15](#_Toc529996072)

[Список использованных источников 16](#_Toc529996073)

# ВВЕДЕНИЕ

Ввиду все большей распространенности беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на топливных элементах (ТЭ) для заправки бортовых газовых баллонов была разработана принципиальная схема мобильного заправочного комплекса (МЗК) получения водорода.

В основу такого типа установок положена технология двухступенчатого получения водородсодержащего газа путем парциального окисления сырья (ДТ) с обогащенным воздухом и последующей паровой каталитической конверсии СО, образующегося на первой стадии. Основным конструктивным узлом такой установки является высокотемпературный реактор (ВТР), конструктивно подобный камерам сгорания (КС) и газогенераторам жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Расчетываются ВТР традиционной конструкции по методикам ЖРД с рядом поправок.

Один из важных параметров МЗК в предполагаемых условиях его эксплуатации – скрытность комплекса. Она определяется, в том числе, его массогабаритными характеристиками. Так как установку предполагается размещать в промышленных контейнерах, встает вопрос оптимальности и плотности компоновки технологического оборудования. ВТР традиционной конструкции имеет большие продольные размеры, что вызывает сложности при его размещении и подключении в условиях ограниченного пространства.

Для уменьшения массогабаритных характеристик предлагается конструкция многоходового ВТР с внутренним парогенератором в виде коаксиального вкладыша. Принципиальная схема предлагаемой конструкции представлена на рисунке 1, а традиционная конструкция последовательного ВТР для сравнения – на рисунке 2.

Особенность предлагаемой многоходовой конструкции реактора заключается в интеграции камеры сгорания и испарительной камеры ВТР в пространственно-совмещенный узел, что позволяет значительно уменьшить суммарную длину реактора.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 1 – Схема многоходового ВТР с внутренним парогенератором |
|  |
| Рисунок 2 – Конструкция традиционного последовательного ВТР |

Протекающие в таком ВТР процессы несколько отличаются от процессов в традиционных конструкциях. Возникает проблема расчета и проектирования многоходовых ВТР, так как на сегодняшний день еще не разработаны необходимые математические модели.

# Постановка задачи

Для создания искомой матмодели необходимо рассмотреть протекающие в ВТР процессы, их особенности и отличия, ввести ряд допущений, а также изучить уже имеющийся материал по данному вопросу.

Целью данной научно-исследовательской работы является обзор источников информации в области разработки математической модели для расчета и проектирования конструкции многоходового высокотемпературного реактора (ВТР). Обзор необходим для выделения необходимых и полезных для процесса разработки искомой матмодели.

Среди задач данной работы можно выделить следующие:

* анализ методики проектирования КС ЖРД;
* анализ методов проектирования парогазогенераторов двигателей двухсредных аппаратов (торпед);
* рассмотрение компьютерного моделирования для решения поставленной задачи;
* выбор метода разработки искомой математической модели.

# Обзор литературы по исследуемому вопросу

## Проектирование КС и ГГ ЖРД

При проектировании ВТР традиционной последовательной конструкции за основу берут известные методики для газогенераторов ЖРД. Методика их расчета и проектирования подробно изложена в книге Добровольского М.В. «Жидкостные ракетные двигатели». Во многом можно заимствовать элементы расчетной схемы из традиционных конструкций в многоходовую с введением соответствующих допущений и поправок.

Одними из первых рассматриваются процессы смесеобразования и конструкции смесительных головок. Так как в рассматриваемом ВТР используется одна двухкомпонентная форсунка для окислителя и горючего, вопрос компоновки форсуночной головки не стоит. Подробно описаны стадии процесса смесеобразования и горения топливной смеси. Здесь важно учитывать, что в рассматриваемой конструкции горючее подается в жидкой фазе, а окислитель – в газообразной.

При расчете форсунки подачи компонентов, можно воспользоваться методикой расчета струйных форсунок. Предполагается, что в многоходовом реакторе будет использоваться такая же форсуночная головка, как и в традиционной конструкции – шатрового типа с одной щелевой однокомпонентной форсункой для ВТЭ и подачей окислителя через центральное отверстие, служащее на пусковом режиме для обеспечения форса пламени из ФК.

Второй важный для рассмотрения вопрос – озлаждение особо теплонапряженных элементов конструкции. Охлаждение КС ЖРД бывает нескольких типов, в том числе:

* наружнее (регенеративное, «по рубашке»);
* внутреннее;
* смешанное;
* радиационное;
* абляционное;
* термостойкими покрытиями и др.

В традиционном ВТР теплонапряженными являются боковые цилиндрические стенки, охлаждение которых можно организовать совершенно аналогичко с КС ЖРД. Однако в многоходовом ВТР появляется промежуточная стенка, температурные условия которой сильно отличаются от обычной стенки, и днище. В предалаемой конструкции ВТР для охлаждения промежуточной стенки, разделяющей полости КС и ИК, целесообразно применять охлаждение регенеративное. Дополнительно может потребоваться охлаждение днища ВТР, но данный вопрос требует предварительного расчета температурных условий его работы. Если охлаждение днища будет необходимо, рассчитать его можно по обычной методике для стенок КС ЖРД.

Расчет регенеративного охлаждения основан на определении конвективных и лучистых тепловых потоков, которые от продуктов сгорания передаются стенке, а от стенки – в охлаждающую жидкость теплопроводность.

Однако в рассматриваемой конструкции ВТР важно учесть ряд отличительных особенностей, а именно:

* наличие внутреннего парогенератора;
* подвод тепла к охлаждаемой стенке с двух сторон – от продуктов сгорания в КС и от парогазовой смеси в ИК.

Внутренний парогенератор располагается между объемом КС и охлаждаемой стенкой. То есть, часть тепла от ПС будет идти на нагрев и испарение подаваемой в парогенератор продуктовой воды, и только оставшаяся часть пойдет в охлаждаемую стенку. При этом стенка парогенератора охлаждается подаваемой водой, поэтому важно рассчитать ее количество и скорость движения так, чтобы исключить возможность прогара.

Так как вкладыш (стенка) парогенератора заканчивается раньше, чем охлаждаемая промежуточная стенка, часть длины этой стенки охлаждается регенеративно («по рубашке») и дополнительно стекающей жидкофазной водой, которая не успела испариться в тракте парогенератора. Возможен случай, когда жидкофазной воды к концу парогенератора не останется, либо будет недостаточно для создания защитной пленки. Расчет необходимо провести таким образом, чтобы к концу парогенератора в потоке была как жидкая вода, так и пар. При этом температура в нижней части КС ниже, поэтому требования к системе охлаждения не такие высокие. Расчет и проектирование системы охлаждения требует особого внимания к процессам в парогенераторе.

Подвод тепла к охлаждаемой стенке со стороны ИК требует введения в систему дополнительного уравнения для учета этих тепловых потоков. При этом важно, что суммарный тепловой поток со стороны ИК зависит от температуры парогаза в ИК. Температура эта зависит от количества подаваемой продуктовой воды, определяемого по ряду факторов:

* потребным количеством пара для каталитической конверсии на последующих этапах (т.е. массовыми расходами окислителя и горючего);
* требованиями к охлаждению стенки парогенератора;
* потребным снижением температуры парогаза до рабочей температуры последующих ступеней установки.

Получается, что в ВТР различной производительности (с различными массовыми расходами основных компонентов) количество продуктовой воды, определенное по потребному количеству пара, может оказаться как избыточным, так и недостаточным для охлаждения парогенератора. Поэтому система охлаждения требует расчета в привязке к количеству подаваемой продуктовой воды. Отсюда возникает необходимость проводить расчет методом последовательных приближений, что позволит найти решение, максимально отвечающее всем условиям.

Таким образом, схема расчета системы охлаждения КС ЖРД, в целом, подходим для расчета охлаждения многоходового ВТР, однако необходимо ввести дополнительные уравнения, которые будут учитывать подвод тепла к охлаждающей жидкости не только со стороны КС, но и со стороны ИК.

## Проектирование парогазогенераторов ДДА

Парогазогенераторы двигателей двухсредных аппаратов (ДДА), называемые также подогревателями, являются близкими по устройству и принципу действия к газогенераторам ЖРД. При разработке этих устройств большое внимание уделяется организации и протеканию процесса подачи воды, что обуславливает обширную теоретическую базу, которая может оказаться полезной при разработке искомой матмодели многоходового ВТР.

Особенности двухфазных течений в рабочих каналах энергоустановки торпеды описаны в книге В.А. Башкатова «Гидрореактивные пропульсивные установки». Среди прочих рассматриваются гидрореактивные пропульсивные установки (ГРПУ) тепловые, или термодинамические, в которых ускорение жидкой или газообразной воды происходит в ходе термодинамического процесса. Этот случай наиболее близок к процессам в рассматриваемом ВТР.

В каналах возможны три типа двухфазных течений: поршневое, мелкодисперсное и перистальтическое. в мелкодисперсном течении взаимодействие газофазной и жидкой среды может реализовываться в трех вариантах.

Первый вариант: в сплошной газовый поток впрыскивается жидкофазная вода в виде капель. Так как скорость газа много больше скорости подаваемой жидкости, капли увлекаются потоком и разгоняются.

Второй: в сплошной поток воды подается газообразное рабочее тело в виде пузырьков. Из-за разности давлений в зоне подаче и зоне выхлопа, пузырьки разгоняются и увлекают за собой жидкую фазу.

Третий вариант: вода в виде капель впрыскивается в поток пара, скорость которого много выше скорости подачи. Этот случай похож на первый, однако в данном варианте имеет место процессы теплообмена и конденсации пара, в результате чего течение к определенному моменту становится потоком воды с пузырьками пара.

В случае рассматриваемого ВТР при подаче продуктовой воды через внутренний парогенератор с ее дальнейшим разбрызгиванием при развороте потока на 180 град. (при переходе из КС в ИК) имеет место первый вариант протекания процессов. Т.е. расчет необходимо вести для потока с газокапельной структурой, так как при распаде струи жидкости в потоке газа капли имеют различные диаметры, определяемые эмпирическими зависимостями, имеющими характер вероятностного распределения. Для этого расчета приведен ряд необходимых зависимостей и законов.

Для определения количества воды, которую необходимо подать в ВТР для получения рабочего тела заданной температуры, можно воспользоваться методикой расчета, приведенной в книге «Теоретические основы торпедного оружия» Г.М. Подобрия. При этом расчет процессов в парогазгенераторе торпедного двигателя можно проводить на основе одного из двух предположений:

* вода будет испаряться в неравновесной газовой смеси, так как для восстановления химического и энергетического равновесия требуется много времени.
* вода будет испаряться в равновесной газовой смеси.

Основу расчета составляют уравнения теплового баланса, составляемые на основе представлений о физических процессах. При использовании приведенных систем уравнений важно делать поправку на применяемые допущения, которые в случае рассматриваемого ВТР могут отличаться от принятых для парогазогенератора торпедного двигателя.

Обобщенная система уравнений для процессов в парогазогенераторе торпедного двигателя приводится в учебном пособии Г.Б. Савченко «Двигатели двухсредных аппаратов», однако необходимо сравнить обозначенные там допущения с тем, которые будут приняты при разработке матмодели многоходового ВТР.

## Компьютерное математическое моделирование

В задачах математического моделирования на сегодняшний день широко используются методы компьютерного моделирования процессов с использованием численных методов. Широкое их распространений делает целесообразным рассмотрение варианта их применения в рассматриваемой задаче.

Численное моделирование позволяет решить прямую задачу, т.е. на основе имеющейся геометрии и параметров процесса рассмотреть его течение и поведение в отдельных элементах конструкции. Для решения таких задач существует множество программных продуктов, среди которых наиболее распространенным является Ansys.

Решение обратной задачи, когда необходимо определить геометрию, способную обеспечить заданные параметры при известных входных условиях, является более сложным. Дело в том, что универсальных программных продуктов для таких задач нет, и разработать их крайне сложно, ввиду специфики проектирования каждого конкретного типа устройств. Поэтому существует ряд программ для решения обратной задачи, разработанные для конкретных областей проектирования. Например, для моделирования лопаточных машин существует программы AxStream и Numeca, а также модуль Compal в пакете Concept NREC.

Для проведения термодинамических расчетов КС и ГГ ЖРД на кафедре А8 БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова используется программный продукт Termoras, разработанный ФГУП РНЦ «Прикладная химия» (ГИПХ). Он позволяет разрешить систему уравнений Новье-Стокса в трех основных сечениях камеры ракетного двигателя на основе заданных входных параметров.

Специализированные же пакеты для решения обратной задачи применительно к ВТР на данный момент нет. Это может быть связано с тем, что такого типа установки имеют очень широкий спектр модификаций под разные области применения, что сказывается, в том числе, и на конструктивных решениях, затрудняя создание обобщенных алгоритмов.

Решение прямой задачи в рассматриваемой работе можно выполнить в рамках проведения поверочного расчета. Его можно использовать для доказательства оптимальности геометрии конструкции рассматриваемого ВТР, полученной на основе расчета по разработанной математической модели. Если полученная конструкция будет отвечать предъявляемым требованиям, то можно сказать, что матмодель для ее расчета и проектирования является рабочей. Для проведения поверочного расчета можно использовать модуль Fluent программы ANSYS, как наиболее распространенный для моделирования внутренних течений с химическими реакциями.

# Выбор метода математического моделирования

Для математического моделирования существует два основных подхода:

* написание математических моделей в виде системы уравнений с возможностью последующей полной или частичной автоматизацией расчетов;
* численное моделирование.

В первом случае необходимо разработать систему уравнений для решений поставленной задачи на основе известных зависимостей и законов с учетом введенных допущений и упрощений. Важно иметь достаточно полное представление о природе и ходе протекания моделируемых физических процессов.

На основе полученных матмоделей затем можно создать автоматизированный расчетный комплекс, который позволит производить расчеты полностью или частично автоматически, на основе задаваемых входных параметров. Однако здесь отдельно будет стоять вопрос оптимизации расчетной схемы, а также поискать оптимального решения задачи. Так же важно учитывать, что автоматизированный алгоритм будет считать геометрию для конкретной конструкции ВТР. Возможность создания алгоритма выбора оптимальной конструкции из ряда возможных вариантов, закладываемых в программу из опыта конструирования, является отдельной обширной задачей.

Во втором случае можно решить прямую или обратную задачу, как было описано выше. Однако в данном случае необходимо для решения обратной задачи иметь специализированное программное обеспечение, работающее с конкретным классом устройств.

Для решаемой задачи, очевидно, применение второго метода на данный момент невозможно, так как на начальном этапе необходимо решить задачу обратную, т.е. создать расчетную модель, которая по заданным входным и выходным параметрам позволит определить оптимальную геометрию.

Таким образом, для разработки матмодели многоходового ВТР необходимо разработать систему уравнений с возможностью дальнейшей оптимизации и автоматизации.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного анализа доступных источников были выделены необходимые блоки информации, которые будут использоваться при разработке математической модели многоходового ВТР с внутренним парогенератором. Изучены фундаментальные труды в области расчета и проектирования установок, близких по конструкции и назначению к рассматриваемому ВТР.

Рассмотрены методики расчета и проектирования КС и ГГ ЖРД, а также парогазогенераторов (подогревателей) торпедных двигателей. Проанализирована возможность применения компьютерного моделирования в рамках решаемой задачи.

По итогам работы был выбран метод разработки искомой матмодели, а также выделены обобщенные требования к результатам разработки, а именно – возможность полной или частичной автоматизации расчетов.

Перед началом работы над математической моделью важно принять упрощения и допущения, целесообразные в рамках поставленной задачи. Это необходимо для того, чтобы оценивать применимость конкретных имеющихся уравнений и систем к рассматриваемой задаче, так как вывод этих зависимостей производился на основе определенных утверждений.

# Список использованных источников

1. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Д.А. Ягодникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005г. – 488с.
2. Савченко Г.Б. Двигатели двусредных аппаратов: учебн. пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2006. с.
3. Башкатов, В.А. Гидрореактивные пропульсивные установки. / В.А. Башкатов, П.П. Орлов, Федосов М.И. – Л.: «Судостроение», 1997 г., – 296с.
4. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена. Издание 2-е / С.С. Кутателадзе – М.: «Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы», 1962 г., – 456с.
5. Мустейкис, А.И. Численное решение задач теплообмена: учебное пособие / А.И. Мустейкис, Л.П. Юнаков – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2015 г.
6. Мустейкис, А.И. Численное решение задач конвекции и диффузии: учебное пособие / А.И. Мустейкис, Л.П. Юнаков – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т.
7. Мустейкис, А. И. Численное решение задач теплопроводности: практическое пособие / А.И. Мустейкис, Л.П. Юнаков – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2015 г.
8. Аникина В.Д. Разработка высокотемпературного реактора в составе заправочного комплекса для обеспечения работы беспилотных летательных аппаратов. / В.Д. Аникина // ВКР; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2017. – 75с.
9. ANSYS Fluent Theory Guide 2013 / ANSYS, Inc. Release 15, U.S.A., 2013. – 814с.
10. Денисов, М.А. Математическое моделирование теплофизических процессов. ANSYS и CAE-проектирование / М.А. Денисов – Екб.: «УрФУ», 2011г., – 149с.