

**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	<u>А</u>
	индекс факультета
Выпускающая кафедра	<u>А3</u>
	индекс кафедры
Группа	<u>А342</u>
	индекс группы

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ АЗ  
 \_\_\_\_\_ индекс кафедры  
 Бабук В.А.  
 \_\_\_\_\_  
 Фамилия ИО \_\_\_\_\_  
 « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_  
 20 г.

# ОТЧЕТ

## о прохождении учебной научно-исследовательской практики (УНИРС)

наименование практики

Токарь Елизавета Егоровна

Фамилия, имя, отчество обучающегося

**обучающегося по  
направлению/специальности**  
нужное подчеркнуть

24.03.01

КОД

## Ракетные комплексы и космонавтика

полное наименование направления/специальности

**Руководитель практики:**

Низяев А.А., к.т.н., доцент

Фамилия ИО, ученая степень, ученое звание, должность

**Срок прохождения практики:** с \_\_\_\_\_ Г. по \_\_\_\_\_ Г.

Должность обучающегося на практике: студент

**Руководитель практики:**

Подпись \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_

Фамилия ИО \_\_\_\_\_

20 \_\_\_\_ г.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2018 г.

## Оглавление

Перечень сокращений, условных обозначений, единиц и терминов .....	3
Введение .....	4
1 Газогенератор .....	5
1.1 Классификация и основные параметры .....	5
1.2 Жидкостной газогенератор .....	5
1.3 Особенности процессов в ЖГГ .....	7
1.4 Расчет параметров газогенератора .....	8
1.4.1 Термодинамический метод определение параметров продуктов сгорания топлива в камере ГГ .....	8
1.4.2 Определение расходов компонентов через ЖГГ .....	16
1.4.3 Определение параметров работы основных агрегатов и давления ЖГГ .....	17
1.4.4 Геометрический расчет параметров газогенератора .....	22
1.4.5 Газодинамический расчет параметров течения в газогенераторе .....	26
1.4.6 Расчет входного сечения для подвода компонентов топлива в ГГ .....	28
Заключение .....	30
Список использованных источников .....	31

## Перечень сокращений, условных обозначений, единиц и терминов

АТ – азотный тетраоксид

ГГ – газогенератор

ДУ – двигательная установка

ЖГГ – жидкостной газогенератор

ЖРД – жидкостный ракетный двигатель

НДМГ – несимметричный диметилгидразин

НСП – насосная система подачи

ТДС – термодинамическая система

ТНА – турбонасосный агрегат

## Введение

Актуальность темы. На данный момент большинство разгонных блоков (РБ) на основе жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) работают по открытой схеме, то есть имеют насосную систему подачи (НСП) без дожигания компонентов топлива, поступающих в камеру сгорания двигателя. Основным недостатком такой схемы является то, что после турбины генераторный газ сбрасывается в окружающую среду, что приводит к нерациональному расходу компонентов топлива.

В данной работе рассматривается ЖРД с насосной системой подачи с дожиганием компонентов топлива, то есть двигательные установки (ДУ), работающие по закрытой схеме.

В отличие от ЖРД с открытой схемой, в ЖРД с дожиганием используется весь генераторный газ, которое после турбины поступает в камеру сгорания двигателя и полностью дожигается при соприкосновении с другими компонентами. В результате химическая энергия топлива полностью используется для создания реактивной силы, при этом обеспечивая максимально высокий удельный импульс.

Цель работы: разработать генератор на основе ЖРД закрытого цикла на высококипящих компонентах топлива.

Поставленная в работе цель обусловила необходимость решения следующих задач:

- расчет параметров генератора: определение расхода компонентов, температуры продуктов сгорания, размеров и формы камеры, толщины стенок камеры газогенератора.

## 1 Газогенератор

### 1.1 Классификация и основные параметры

Газогенератор (ГГ) – агрегат ЖРД, в котором основное или вспомогательное топливо в результате экзотермических химических реакций преобразуется в генераторный газ.

Основное назначение газогенератора – получение рабочего тела заданной температуры и в заданном количестве для привода турбонасосного агрегата (ТНА). Газогенераторы могут работать на жидком и твердом топливе.

По числу компонентов, используемых для получения рабочего тела, различают одно- и двухкомпонентные газогенераторы.

В однокомпонентных газогенераторах рабочее тело образуется в результате разложения топлива. Обычно такие ГГ называют парогазогенераторами.

В двухкомпонентных газогенераторах рабочее тело получается вследствие сгорания горючего и окислителя. Такие ГГ принято называть жидкостными газогенераторами (ЖГГ).

Основными параметрами рабочего тела ГГ является температура рабочего тела, величина  $RT$  и расход рабочего тела  $\dot{m}_{ГГ}$ .

Температура рабочего тела, которая необходима для привода турбины, находится в пределах 750...1200 К. Величина  $RT$  рабочего тела характеризует его работоспособность и зависит от применяемых компонентов и их соотношения [1].

### 1.2 Жидкостной газогенератор

В данной работе рассматривается двухкомпонентный жидкостной газогенератор, который используется в ЖРД закрытого цикла на высококипящих компонентах топлива.

Рабочими телами газогенератора являются: окислитель – азотный тетраоксид (АТ), горючее – несимметричный диметилгидразин (НДМГ).

Двухкомпонентные ЖГГ устроены во многом аналогично основным камерам. Они состоят из смесительной головки и корпуса, который имеет регенеративное охлаждение или выполняется неохлаждаемым.

ЖГГ в двигателях с дожиганием являются одним из наиболее нагруженных элементов конструкции двигателя, хотя температура продуктов сгорания в них существенно ниже, чем в камере, но давление заметно больше.

Главная особенность и отличие ЖГГ от камеры сгорания состоит в том, что ЖГГ работают при «смещенном» коэффициенте избытка окислителя  $\alpha$ , т.е. при  $\alpha \gg 1$  или  $\alpha \ll 1$ .

Жидкостные газогенераторы, работающие при  $\alpha \ll 1$ , называют восстановительными, а работающие при  $\alpha \gg 1$ , называют окислительными.

В двигательной установке с дожиганием выбор типа ЖГГ (окислительного или восстановительного) определяется работоспособностью рабочего тела, подводимого на турбину.

В ЖРД с дожиганием на высококипящих компонентах топлива для привода ТНА применяют окислительный ЖГГ. Использование таких ЖГГ исключает возможность образования сажи и ее осаждения по газовому тракту, но требует подбора конструкционных материалов, которые должны надежно (без возгорания) работать при контакте с продуктами сгорания высокого давления, содержащими избыток окислителя [2].

По способу организации процесса получения рабочего тела различают ЖГГ с одноступенчатым и двухступенчатым подводом топлива (однозначные и двухзначные).

При одноступенчатом подводе (рисунок 1.1, а) все топливо подается через головку и в камере ЖГГ происходит сгорание при заданном соотношении компонентов. При двухступенчатом подводе (рисунок 1.1, б) часть топлива (окислителя при  $\alpha \gg 1$ , горючего при  $\alpha \ll 1$  или воды) подается через

специальные форсунки или пояс форсунок, размещенных на некотором отдалении от головки [1].

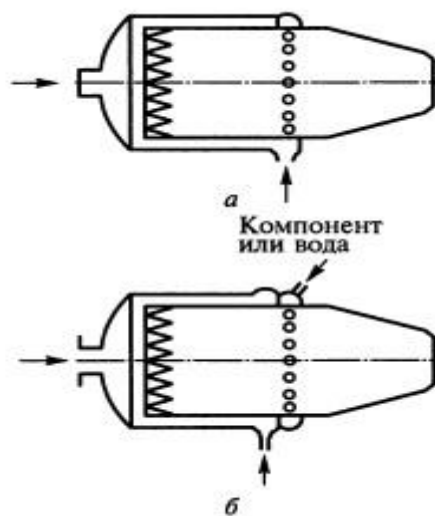


Рисунок 1.1 – Схема ЖГГ с одноступенчатым (а) и двухступенчатым (б) подводом топлива

Дополнением к уже сказанным характеристикам жидкостного газогенератора, который рассматривается в данной работе, является то, что используется неохлаждаемый окислительный ЖГГ с одноступенчатым подводом топлива, который работает на основных компонентах топлива.

### 1.3 Особенности процессов в ЖГГ

Вследствие большого избытка одного из компонентов, в данном случае окислителя, и необходимости обеспечения сравнительно низкой температуры рабочего тела характерны следующие особенности организации процесса образования рабочего тела в ЖГГ.

- Особенности воспламенения. При большом смещении коэффициента окислителя соотношение компонентов становится близким к пределам воспламеняемости и воспламенение затрудняется. Для обеспечения надежного воспламенения применяют двухступенчатый подвод топлива. В

случае, когда топливо подается только от головки, возникает необходимость обеспечения надежного воспламенения ядра, что достигается соответствующим размещением форсунок.

- Температура и химическая неравномерность состава газов. Из-за большого избытка одного из компонентов и низких температур часть избыточного компонента может испариться и не вступить в реакцию.

- Частичная неравномерность процесса. Ввиду низких температур химические реакции протекают медленнее, чем в камере ЖРД. В результате этого изменение состава продуктов сгорания не успевает за изменением температуры и равновесное состояние не устанавливается.

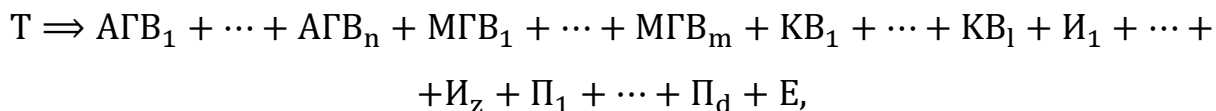
- Влияние химического состава топлива. При использовании компонентов топлива, которые имеют сложную молекулу, вследствие сравнительно низких температур в камере ЖГГ возможно образование продуктов сгорания со сложным молекулярным строением, а при большом избытке углеводородного горючего возможно выделение углерода в твердой фазе (сажи) [1].

#### 1.4 Расчет параметров газогенератора

##### 1.4.1 Термодинамический метод определения параметров продуктов сгорания топлива в камере ГГ

Основной процесс, который определяет явление превращения энергии в камере сгорания, – горение топлива.

Процесс горения схематично можно представить следующим образом:



где  $T$  – топливо;

$\text{АГВ}_i$  –  $i$ -е атомное газообразное вещество;

$\text{МГВ}_j$  –  $j$ -е молекулярное газообразное вещество;

$\text{КВ}_k$  –  $k$ -е конденсированное вещество;

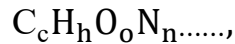


И – отрицательные и положительные ионы;

$\Pi_k$  – насыщенный пар k-го КВ;

Е – электронный газ.

Состав топлива задается с помощью условной формулы, которая имеет следующий вид:



где  $c, h, o, n, \dots$  – число молей соответствующего химического элемента в 1 кг топлива.

При расчете для камеры сгорания делаются следующие допущения о процессе горения топлива:

- смесь продуктов сгорания является равновесной;
- горение осуществляется при постоянном давлении и отсутствии теплообмена с окружающей средой в стационарном режиме;
- смесь газообразных продуктов сгорания – идеальный газ;
- конденсированные продукты сгорания не образуют растворы как между собой, так и с газообразными продуктами;
- кинетическая энергия продуктов сгорания пренебрежимо мала в сравнении с энергией теплового движения [3].

Камера сгорания, как открытая термодинамическая система (ТДС), представлена на рисунке 1.2.

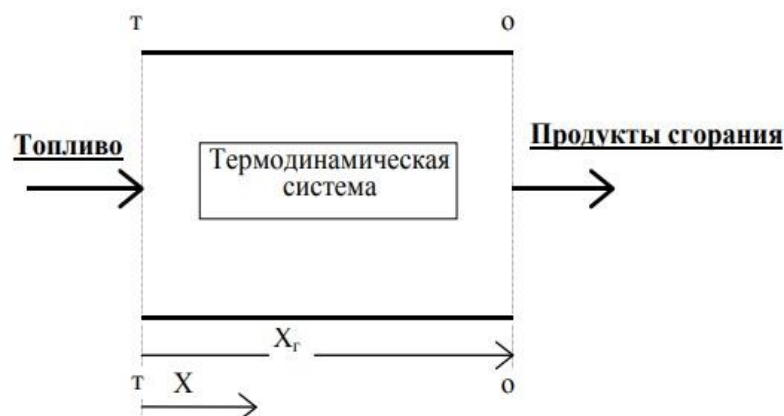


Рисунок 1.2 – Схема сгорания топлива: Х – пространственная координата, т-т и о-о контрольные поверхности, соответствующие исходному топливу и конечным продуктам сгорания

Удельный запас энергии вещества, подводимого в систему и отводимого из нее:

$$\begin{aligned} e_1 &= u_m(T_n) + \frac{p}{\rho_m} = i_m(T_n), \\ e_2 &= u_{np.c}(T) + \frac{p}{\rho} = i_{np.c}(T), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $u_t$ ,  $u_{np.c}$  – удельная внутренняя энергия топлива и продуктов сгорания;

$i_t$ ,  $i_{np.c}$  – удельная энтальпия топлива и продуктов сгорания;

$\rho_t$ ,  $\rho$  – плотность топлива и продуктов сгорания;

$T_n$ ,  $T$  – начальная температура топлива и продуктов сгорания.

Так как теплообмен и работа объемной деформации отсутствуют, а режим процесса горения стационарный, то справедливо следующее соотношение:

$$i_m(T_n) = i_{np.c}(T). \quad (1.2)$$

Данное соотношение является условием равенства полной энтальпии топлива и продуктов сгорания.

Суть термодинамического расчета состоит в решении уравнений трех видов: уравнение материального баланса, а также уравнения, выражающие законы действующих масс и Дальтона.

Уравнения материального баланса – следствия закона сохранения вещества и выражают следующую закономерность: число молей элемента в 1 кг топлива равно числу молей этого элемента во всех соединениях 1 кг продукта сгорания.

Уравнения данного вида записываются для каждого элемента входящего в состав топлива.

Для углерода это уравнение имеет следующий вид:

$$\sum_1^n c_{Gi} p_{Gi} + \sum_1^m c_{Kj} R_{Kj} + \sum_1^m c_{Kj} p_{Kj}^H + \sum_1^l c_{I_k^{qk}} p_{I_k} + p_c = \frac{P}{n_\Sigma} c, \quad (1.3)$$

где  $p$  – полное давление;

$c$  – коэффициент в условной формуле при углероде;

$p_{Gi}$  – парциальное давление  $i$ -го МГВ;

$c_{Gi}$  – число молей углерода в одном моле  $i$ -го МГВ;

$R_{Kj}$  – условное парциальное давление  $j$ -го КВ;

$$R_{Kj} = p \frac{n_{Kj}}{n_{\Sigma}},$$

$n_{Kj}$  – число молей  $j$ -го КВ в 1 кг продуктов сгорания;

$n_{\Sigma}$  – число молей газообразных продуктов в 1 кг продуктов сгорания;

$c_{Kj}$  – число молей углерода в одном моле  $j$ -го КВ;

$p_{Kj}^H$  – давление насыщающих паров  $j$ -го КВ;

$c_{I_k^{qk}}$  – парциальное давление  $k$ -го иона;

$c_{Ik}$  – число молей углерода в одном моле  $k$ -го иона;

$p_C$  – парциальное давление атомарного углерода.

Уравнение равновесия – математическая формулировка закона действующих масс.

В равновесной смеси продуктов химического взаимодействия протекает большое количество равновесных химических реакций, которые могут быть выражены через независимые химические реакции.

Уравнение диссоциации и соответствующие уравнения равновесия имеют следующий вид:

$$G_i \leftrightarrow c_{Gi} \cdot C + h_{Gi} \cdot H + o_{Gi} \cdot O + \dots,$$
$$K_{pi} = \frac{p_C^{c_{Gi}} \cdot p_H^{h_{Gi}} \dots}{p_{Gi}}, \quad (1.4)$$

$K_{pi}$  – константа равновесия реакции диссоциации.

Уравнение, выражающее закон Дальтона:

$$\sum_1^n p_{Gi} + \sum_1^m p_{Kj}^H + \sum_1^l p_{I_k^{qk}} + p_C + p_H + \dots = p. \quad (1.5)$$

Решение системы уравнений (1.3) – (1.5) позволяет найти неизвестные, описывающие состав, а следовательно, все термодинамические функции, включая энтальпию:

$$i_{np.c}(T) = \frac{n_{\Sigma}}{p} \left\{ \sum_1^n p_{\Gamma_i} i_{\mu\Gamma_i}(T) + \sum_1^m R_{K_j} i_{\mu K_j}(T) + \sum_1^m p_{K_j}^H i_{\mu K_j}^H(T) + \right. \\ \left. + \sum_1^l p_{I_k^{qk}} i_{I_k^{qk}}(T) + p_C i_{\mu C}(T) + \dots \right\}, \quad (1.6)$$

где нижний индекс  $\mu$  указывает на мольное значение соответствующей термодинамической функции.

Численно система уравнений решается с помощью метода Ньютона.

Процесс нахождения состава продуктов сгорания:

Компоненты задаются либо химической, либо условной формулой.

Коэффициенты условной формулы могут быть найдены с помощью следующих соотношений:

$$c = \sum_1^{nn} \frac{c_{\mu i} g_i}{\mu_i}; \quad h = \sum_1^{nn} \frac{h_{\mu i} g_i}{\mu_i} \quad \text{или} \quad c = \sum_1^{nn} c_i g_i; \quad h = \sum_1^{nn} h_i g_i, \quad (1.7)$$

где  $nn$  – количество компонентов в составе топлива;

$c_{\mu i}$ ,  $h_{\mu i}$ , ... – число молей углерода, водорода и т.д. в одном моле  $i$ -го компонента;

$\mu_i$  – масса моля  $i$ -го компонента;

$g_i$  – массовая доля  $i$ -го компонента;

$c_i$ ,  $h_i$ , ... – коэффициент в условной формуле  $i$ -го компонента при углероде, водороде и т.д.

Важной характеристикой топлива, характеризующей его энергосодержание, является энтальпия:

$$i_n(T_n) = \sum_1^{nn} i_i(T_n) g_i, \quad (1.8)$$

где  $i_i(T_n)$  – удельная энтальпия  $i$ -го компонента при начальной температуре.

Для оценки свойств топлива определяется коэффициент избытка окислителя элементов:

$$\alpha_o = - \frac{\sum b_{mi}^{(-)} v_i^{(-)}}{\sum b_{mj}^{(+)} v_j^{(+)}} \quad (1.9)$$

где  $b_{mi}^{(-)}, b_{mj}^{(+)}$  – коэффициенты в условной формуле топлива при окислительных и горючих элементах;

$\nu_i^{(-)}, \nu_j^{(+)}$  – наивысшая валентность окислительных и горючих элементов (для азота принимается валентность, равная нулю).

Молярная масса ( $\mu_{\Gamma}$ ) и газовая постоянная продуктов сгорания ( $R_{\Gamma}$ ):

$$\mu_{\Gamma} = \frac{1}{n_c},$$
$$R_{\Gamma} = \frac{R}{\mu}, \quad (1.10)$$

где  $n_c$  – число моль газа продуктов в 1 кг;

$R$  – универсальная газовая постоянная ( $R=8,314$  Дж/(моль К)).

Расчет проводится при варьировании состава топлива. По результатам варьирования для каждой точки определяется температура и зависимость  $i_{пр.с.}(T)$ , необходимая для определения истинной температуры, при которой справедливо соотношение (1.2). При температуре, принятой за истинную, расчет проводится еще раз.

Если расчетная температура получится больше допустимой температуры материала ( $T_{доп}$ ), из которого изготовлен ЖГГ, то необходимо изменить состав топлива. Для нового топлива вновь проводится расчет по определению состава продуктов сгорания и энтальпии топлива, а также решается уравнение (1.2) и определяется новая температура.

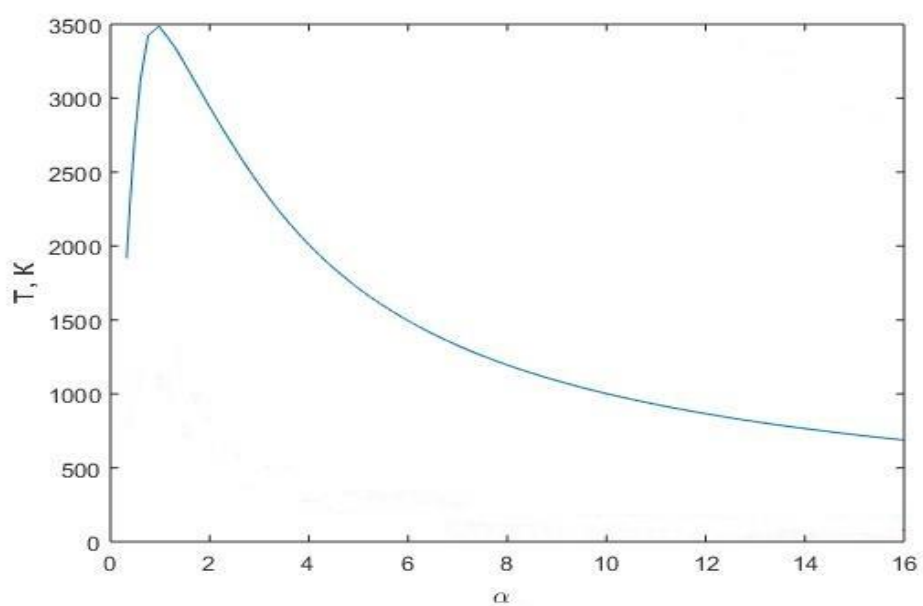
Результаты произведенного термодинамического расчета.

Термодинамический расчёт проводился в программе MATLAB. Расчёты проводились при значении давления 10 МПа и значениях энтальпий:

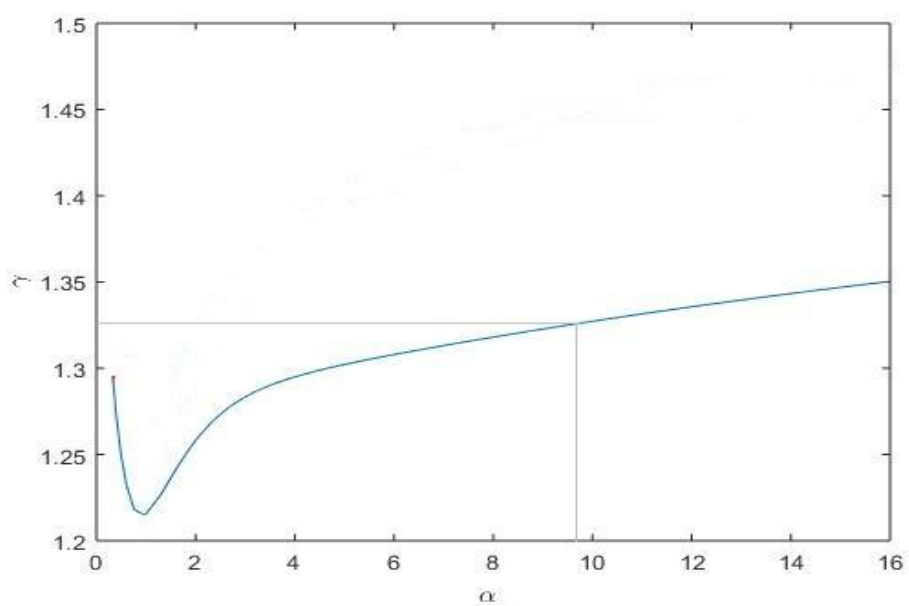
- азотного тетраоксида – -207 кДж/кг;
- несимметричного диметилгидразин 828 кДж/кг.

Для изготовления газогенератора используются жаропрочные стали, имеющие температуру  $T_{доп} = 1200$  К.

Характер изменения параметров  $T_{гг}$ ,  $\gamma$ ,  $n_c$  от коэффициент избытка окислителя  $\alpha_{гг}$  приведен на рисунке 1.3.



а



б

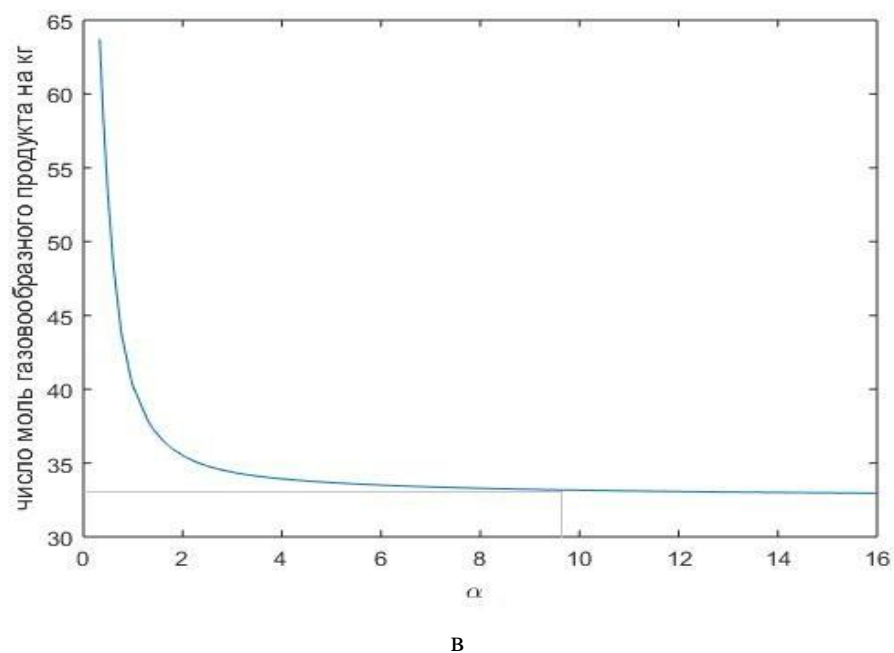


Рисунок 1.3 - Графики зависимости:

а – температуры  $T$  от коэффициента избытка окислителя  $\alpha_{ГГ}$ ; б – показателя адиабаты  $\gamma$  от коэффициента избытка окислителя  $\alpha_{ГГ}$ ; в – числа моль газообразного продукта в 1 кг  $n_c$  от коэффициента избытка окислителя  $\alpha_{ГГ}$

По графикам зависимостей были определены значения показателя адиабаты  $\gamma$  и числа моль газообразного продукта в 1 кг  $n_c$ , в соответствии с рисунком 1.3 б и в.

Результаты проведенного термодинамического расчёта приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты термодинамического расчета

Параметр	Обозначение	Значение параметров
Коэффициент избытка окислителя	$\alpha_{ГГ}$	9,864
Температура в ГГ, К	$T_{ГГ}$	1012,52
Показатель адиабаты	$\gamma$	1,327

Продолжение таблицы 1.1

Параметр	Обозначение	Значение параметров
Число моль газообразного продукта в 1 кг, моль/кг	$n_c$	33,16
Молярная масса продуктов сгорания, кг/моль	$\mu_{\Gamma}$	0,03
Газовая постоянная продуктов сгорания, Дж/(кг·К)	$R_{\Gamma}$	275,692

#### 1.4.2 Определение расходов компонентов через ЖГГ

В двигательных установках с дожиганием типа «газ + жидкость» суммарный расход компонентов через ЖГГ определяется принятой температурой рабочего тела. Это связано с тем, что один из компонентов топлива полностью подается в генератор и расход его через ЖГГ равен расходу в камеру ЖРД. Расход второго подбирается так, чтобы температура рабочего тела не превышала допустимой температуры нагрева лопаток турбины, и определяется принятым значением массового соотношения компонентов в ЖГГ ( $K_{m.ГГ}$ ).

При окислительной схеме расход компонентов определяется следующим образом:

$$\dot{m}_{o.ГГ} = \dot{m}_o, \quad (1.11)$$

$$\dot{m}_{г.ГГ} = \frac{\dot{m}_{o.ГГ}}{K_{m.ГГ}}, \quad (1.12)$$

где  $\dot{m}_{o.ГГ}$ ,  $\dot{m}_{г.ГГ}$  – расход окислителя и горючего через газогенератор;

$\dot{m}_o$  – расход окислителя через камеру ЖРД;

$K_{m.ГГ}$  – массового соотношения компонентов в газогенераторе.



Массового соотношения компонентов в газогенераторе определяется следующим образом:

$$K_{m.ГГ} = \alpha_{ГГ} \cdot K_m, \quad (1.13)$$

где  $\alpha_{ГГ}$  – коэффициент избытка окислителя а газогенераторе;

$K_m$  – стехиометрическое соотношение компонентов топлива.

Суммарный расход компонентов через газогенератор определяется следующим соотношением:

$$\dot{m}_{ГГ} = \dot{m}_{o.ГГ} + \dot{m}_{г.ГГ}. \quad (1.14)$$

Результаты проведенного расчёта приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Значения расходов компонентов топлива через ГГ

Параметр	Обозначение	Значение параметров
Массового соотношения компонентов	$K_{m.ГГ}$	30,282
Расход окислителя, кг/с	$\dot{m}_{o.ГГ}$	4,384
Расход горючего, кг/с	$\dot{m}_{г.ГГ}$	0,145
Суммарный расход компонентов, кг/с	$\dot{m}_{ГГ}$	4,529

#### 1.4.3 Определение параметров работы основных агрегатов и давления ЖГГ

Основным уравнением, позволяющим при заданном давлении в камере сгорания определить давление в ЖГГ, необходимое для привода ТНА, а следовательно, и давление, необходимое для подачи (иногда его называют давлением, при котором схема замыкается), является уравнение баланса мощности, потребляемой насосами и развиваемой турбиной [1]:

$$N_T = \sum N_H. \quad (1.15)$$

Уравнение мощности, потребляемой насосами окислителя и горючего, имеет следующий вид:

$$\sum N_H = \frac{\dot{m}_O(p_{\text{под.о}} - p_{\text{вх.о}})}{\rho_O \eta_{\text{н.о}}} + \frac{\dot{m}_Г(p_{\text{под.г}} - p_{\text{вх.г}})}{\rho_O \eta_{\text{н.г}}}. \quad (1.16)$$

Уравнение мощности, развиваемой турбиной, имеет следующий вид:

$$N_T = \dot{m}_T \eta_T \frac{\gamma}{\gamma - 1} R T_{\text{вх}}^* \left[ 1 - \left( \frac{p_{\text{вых}}}{p_{\text{вх}}^*} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]. \quad (1.17)$$

где  $\dot{m}_T$  – расход рабочего тела через турбину, равный расходу компонентов через ЖГГ;

$\gamma$  – показатель адиабаты продуктов сгорания ЖГГ;

$\dot{m}_Г$  – расход горючего через камеру ЖРД;

$\eta_T, \eta_{\text{н.о}}, \eta_{\text{н.г}}$  – эффективный КПД турбины и КПД насосов окислителя и горючего;

$p_{\text{под.о}}, p_{\text{под.г}}$  – давление подачи компонентов насосами;

$p_{\text{вх.о}}, p_{\text{вх.г}}$  – давление окислителя и горючего на входе в насос;

$R$  – газовая постоянная, считаем равной газовой постоянной в ЖГГ;

$T_{\text{вх}}^*$  – температура торможения рабочего тела на входе в турбину, считаем равной температуре в ЖГГ.

При замкнутой схеме давление  $p_{\text{вых}}$  определяется давлением в камере сгорания:

$$p_{\text{вых}} = p_K + \Delta p_K, \quad (1.18)$$

где  $p_K$  – давление в камере сгорания;

$\Delta p_K$  – потери давления продуктов сгорания на пути от турбины до камеры сгорания.

Давление на входе в турбину можно считать равным давлению в ЖГГ:

$$p_{\text{вх}}^* \approx p_{\text{ГГ}}. \quad (1.19)$$

Перепад давления на турбине с учетом соотношений (1.18) и (1.19) определяется по формуле:

$$\pi_T = \frac{p_{\text{вх}}^*}{p_{\text{вых}}} = \frac{p_{\text{ГГ}}}{p_K + \Delta p_K}. \quad (1.20)$$

Давление подачи насосов, выше давления в ЖГГ на величину гидравлических потерь давления компонентов на пути от насоса до камеры сгорания ЖГГ, т.е. в общем случае имеет следующий вид:

$$p_{\text{под}} = p_{\text{ГГ}} + \Delta p_{\text{ГГ}}, \quad (1.21)$$

где  $\Delta p_{\text{ГГ}}$  – потери давления компонента в магистралях, клапанах, регулирующих устройствах, находящихся на пути от насоса до ЖГГ, а также в трактах и форсунках ЖГГ;

$p_{\text{ГГ}}$  – давление в газогенераторе

$$p_{\text{ГГ}} = \pi_{\text{т}}(p_{\text{к}} + \Delta p_{\text{к}}). \quad (1.22)$$

Для простоты анализа предполагается, что КПД насосов горючего и окислителя, потери давления  $\Delta p_{\text{ГГ}}$  в линиях горючего и окислителя и давления на входе в насосы равны и не зависят от параметров работы установки:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{н.о}} &= \eta_{\text{н.г}} = \eta_{\text{н}} = \text{const}, \\ \Delta p_{\text{ГГ.о}} &= \Delta p_{\text{ГГ.г}} = \Delta p_{\text{ГГ}} = \text{const}, \\ p_{\text{вх.о}} &= p_{\text{вх.г}} = p_{\text{вх.н}} = \text{const}. \end{aligned} \quad (1.23)$$

Также считаем, что потери  $\Delta p_{\text{к}}$  не зависят от параметров работы.

Тогда уравнения для мощностей можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} N_{\text{т}} &= \dot{m}_{\text{т}} \eta_{\text{т}} \frac{\gamma}{\gamma - 1} (RT)_{\text{ГГ}} \left[ 1 - (\pi_{\text{т}})^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right], \\ N_{\text{н}} &= \frac{\pi_{\text{т}}(p_{\text{к}} + \Delta p_{\text{к}}) + \Delta p_{\text{ГГ.о}} - p_{\text{вх.н}}}{\eta_{\text{н}}} Q_{\Sigma}, \end{aligned} \quad (1.24)$$

где  $Q_{\Sigma}$  - суммарный объемный расход жидкости, проходящий через насосы.

$$Q_{\Sigma} = \frac{\dot{m}_{\text{о}}}{\rho_{\text{о}}} + \frac{\dot{m}_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}}}, \quad (1.25)$$

где  $\rho_{\text{о}}$  и  $\rho_{\text{г}}$  – плотности окислителя и горючего.

Эти уравнения решаются с помощью варьирования параметра  $\pi_{\text{т}}$ . После определения для каждого  $\pi_{\text{т}}$  величину  $\pi_{\text{т}}(p_{\text{к}} + \Delta p_{\text{к}})$ , строятся графики зависимостей располагаемой мощности турбины  $N_{\text{т}}$  и потребной мощности насосов  $N_{\text{н}}$  от перепада давления на турбине  $\pi_{\text{т}}$ . Точка пересечения кривых

является расчетным значением  $\pi_{т.р.}$  и мощности ТНА  $N_p$ , при которых схема замыкается (рисунок 1.4).

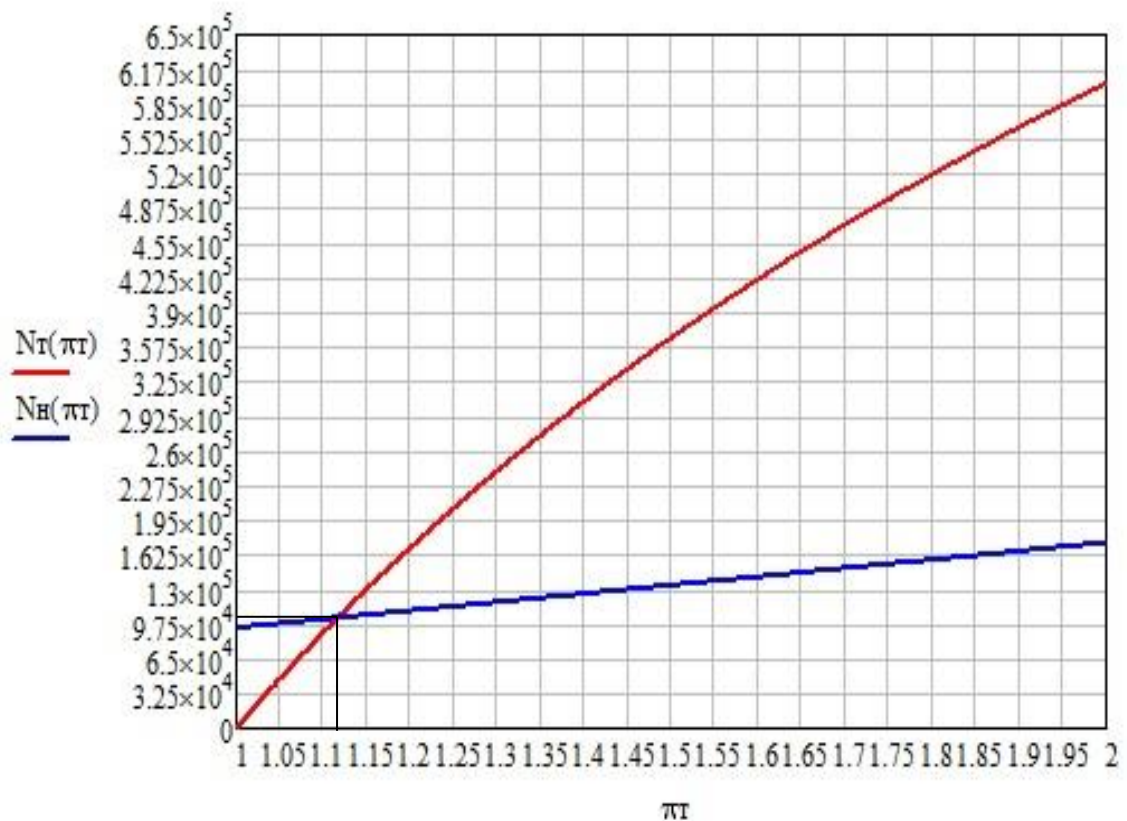


Рисунок 1.4 – Зависимость располагаемой мощности турбины  $N_t$  и потребляемой мощности насосов  $N_n$  от  $\pi_t$

При решении заданы и известны из расчета камеры двигателя и ЖГГ расходы компонентов и значение показателя адиабаты продуктов сгорания. Значения КПД насосов и турбин выбираются из диапазонов значений, применяемых для ЖРД.

КПД насосов. Потери в насосе и полный его КПД ( $\eta_n$ ) характеризуются тремя КПД: объемным ( $\eta_o$ ), гидравлическим ( $\eta_r$ ) и механическим ( $\eta_m$ ).

Величина КПД для насосов ЖРД:

- объемный КПД –  $\eta_o = 0,9 - 0,95$ ;
- гидравлический КПД –  $\eta_r = 0,7 - 0,9$ ;
- механический КПД –  $\eta_m = 0,85 - 0,98$  [1].

Полный КПД насосов определяется по формуле:

$$\eta_n = \eta_o \eta_{\Gamma} \eta_m. \quad (1.26)$$

Газовые турбины, используемые в ЖРД с дожиганием генераторного газа, называют предкамерными. Для них характерны большой массовый расход газа и малый перепад давления, связанный с необходимостью подачи генераторного газа с выхода турбины в камеру сгорания двигателя. Из-за малого перепада давления скорость газа в турбине остается дозвуковой.

Малый перепад давления в предкамерных турбинах делает целесообразным использование только одной ступени. Движение газа в турбине с дозвуковой скоростью существенно снижает потери и позволяет достичь более высоких значений КПД:  $\eta_n = 0,75 - 0,85$  [4].

Давление на входе в насосы находится в пределах –  $p_{\text{нвх}} = (2...4) \cdot 10^5$  Па [5].

Оценка потерь давления проводится исходя из следующих рекомендаций [6]:

- регуляторы, дроссели системы опорожнения баков:

$$\Delta p = 20 - 30 \text{ кг/см}^2;$$

- пусковые и отсечные клапаны:  $\Delta p = 10 - 20 \text{ кг/см}^2$ ;
- магистрали низкого давления:  $\Delta p = 1 - 2 \text{ кг/см}^2$ ;
- магистрали высокого давления:  $\Delta p = 5 - 10 \text{ кг/см}^2$ .

Результаты произведенного расчета.

Потери давления на пути от насосов до камеры ЖГГ и от турбины до камеры сгорания считаются постоянными при всех режимах работы установки. Значения давления подачи на входе в насосы и потери давления выбираются из уже существующих диапазонов. Для потерь выбор значения производится с учетом рекомендаций. Значения потерь давления, давления подачи и КПД насосов и турбины представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Параметры	Обозначение	Значения параметров
Потери давления, МПа	$\Delta p_{ГГ}$	2,2
	$\Delta p_{к}$	0,98
Давление подачи на входе в насосы, МПа	$p_{н.вх}$	0,3
КПД: насосов	$\eta_{н}$	0,677
турбины	$\eta_{т}$	0,75

Полученные при расчетах значения представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Параметры работы основных агрегатов

Параметры	Обозначение	Значения параметров
Мощность, Вт: турбины насосов	$N_{т}$	$1,043 \cdot 10^5$
	$N_{н}$	$1,03 \cdot 10^5$
Перепад давлений	$\pi_{т}$	1,118
Давление в ЖГГ, МПа	$p_{ГГ}$	12,28
Давление на выходе из турбины, МПа	$p_{вых}$	10,98
Давление подачи компонентов насосами, МПа	$p_{под}$	14,48

#### 1.4.4 Геометрический расчет параметров газогенератора

Камера сгорания газогенератора.

Расчеты камеры сгорания должны обеспечивать полноту протекания процессов: распыла компонентов, их испарение, диффузионного смешения и химического взаимодействия.

Габариты камеры принято оценивать временем пребывания топлива в ней  $\tau_{\text{преб}}$  или приведенной длиной камеры  $L_{\text{прив}}$ . Эти величины связаны друг с другом выражением [5]:

$$\tau_{\text{преб}} = \frac{L_{\text{прив}}}{\alpha_{\gamma} \sqrt{R_{\Gamma} T_{\Gamma}}}, \quad (1.27)$$

где  $T_{\Gamma}$  – температура продуктов сгорания в камере сгорания ЖГГ;

$\alpha_{\gamma}$  – коэффициент, который зависит только от коэффициента адиабаты продуктов сгорания:

$$\alpha_{\gamma} = \sqrt{\gamma} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}. \quad (1.28)$$

Значения приведенной длины камеры и стехиометрического массового соотношения компонентов для топлива АТ+НДМГ приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5

Параметр	АТ+НДМГ
$k_{m0}$	3.07
$L_{\text{прив}}, \text{ м}$	1.4...1.6

Требуемый объем камеры сгорания  $V_{\Gamma\Gamma}$  определяется исходя из соотношения:

$$V_{\Gamma\Gamma} = \frac{\tau_{\text{преб}} \dot{m}_{\Gamma\Gamma} T_{\Gamma} R_{\Gamma}}{P_{\Gamma\Gamma}}. \quad (1.29)$$

Значения длины ( $L_{\Gamma\Gamma}$ ) и диаметр камеры ( $D_{\Gamma\Gamma}$ ) находится при решении системы двух уравнений, включающей выражение для объема цилиндрической камеры и относительной длины камеры

$$L_{\text{отн}} = \frac{L_{\Gamma\Gamma}}{D_{\Gamma\Gamma}}, \quad (1.30)$$

принимаемой из статически равной  $1 \dots 1,5$  [5].

При конструкторском расчете для определения толщины стенки учитывают максимальное напряжение (тангенциальное). Толщина стенки камеры ГГ определяется по следующей формуле:

$$\delta_{\text{стГГ}} = \frac{p_{\text{ГГ}} f_p D_{\text{ГГ}}}{2[\sigma_T]}, \quad (1.31)$$

где  $f_p$  – коэффициент безопасности, равен 1,25;

$[\sigma_T]$  – предел текучести материала.

Днище камеры сгорания ГГ (смесительная головка).

Конструкция выпуклых днищ должна отвечать оптимальной величине вылета днищ, при которой его масса будет минимальной. Обычно выпуклость днища оценивается коэффициентом выпуклости, равным:

$$\zeta = \frac{2b}{D_{\text{ГГ}}}, \quad (1.32)$$

где  $b$  – вылет днища.

Для сферических днищ (рисунок 1.5) оптимальный коэффициент выпуклости равен 0,85.

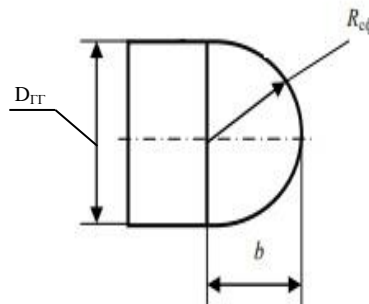


Рисунок 1.5 – Сферическое днище

Толщина стенки определяется выражением:

$$\delta_{\text{сф}} = \frac{p_{\text{ГГ}} f_p R_{\text{сф}}}{2[\sigma_T]}, \quad (1.33)$$

где  $R_{\text{сф}}$  – радиус сферы.



$$R_{сф} = \frac{D_{22}}{4} + \frac{1+\zeta^2}{\zeta}. \quad (1.34)$$

Для изготовления газогенератора используются жаропрочные стали, имеющие температуру 1200 К.

Характеристики жаропрочной высоколегированной стали 20Х23Н18 приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Характеристики стали 20Х23Н18

Температура, °С	900	800	700
$[\sigma_t]$ , МПа	135	195	330

Результаты проведенных расчетов.

Значения параметров  $L_{прив}$  и  $L_{отн}$ , были взяты из уже существующих диапазонов и равны  $L_{прив} = 1,4$  м и  $L_{отн} = 1,25$ .

Результаты геометрических расчетов параметров ГГ и толщин стенок представлены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Геометрические параметры ГГ

Параметр	Обозначение	Значения параметров
Объем ГГ, м <sup>3</sup>	$V_{ГГ}$	$4,06 \cdot 10^{-4}$
Диаметр камеры сгорания ГГ, м	$D_{Г}$	0,075
Длина камеры сгорания ГГ, м	$L_{Г}$	0,093
Сопловая головка, м: вылет радиус	$b$ $R_{сф}$	0,022 0,043

Продолжение таблицы 1.7

Параметр	Обозначение	Значение параметров
Толщина стенок, мм:		
камеры сгорания	$\delta_{стГГ}$	3
смесительной головки	$\delta_{сф}$	2

#### 1.4.5 Газодинамический расчет параметров течения в газогенераторе

Используются следующие допущения:

- истечение газа – адиабатное, изоэнтропное;
- состав продуктов сгорания – неизменный.

В этом случае справедливым является уравнение изоэнтропы:

$$pV^n = \text{const}, \quad (1.35)$$

где  $p$ ,  $V$  – параметры газа в произвольном сечении тракта ГГ;

$n$  – показатель изоэнтропы, равен значению показателя адиабаты  $\gamma$ .

Скорость течения рабочего тела в произвольном сечении, в том числе на выходе из ГГ, определяется по следующему выражению:

$$w_a = \sqrt{2 \frac{n}{n-1} R_{\Gamma} T_{\Gamma} \left[ 1 - \left( \frac{p_a}{p_{ГГ}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}, \quad (1.36)$$

где  $p_a$  – давление в произвольном сечении (на выходе из ГГ).

Относительная скорость потока продуктов сгорания определяется из следующего соотношения:

$$\pi(\lambda) = \frac{p_a}{p_{ГГ}}, \quad (1.37)$$

где  $\pi(\lambda)$  – газодинамическая функция, которая имеет следующий вид

$$\pi(\lambda) = \left( 1 - \frac{n-1}{n+1} \lambda^2 \right)^{\frac{n}{n-1}}, \quad (1.38)$$

Для определения площади сечения на выходе из ГГ, а следовательно и диаметра этого сечения, используется газодинамическая функция.

Площадь сечения на выходе из ГГ определяется по следующему выражению:

$$F_{ar} = n_{\Gamma} F_{кр}, \quad (1.39)$$

где  $n_{\Gamma}$  – геометрическая степень расширения;

$F_{кр}$  – площадь критического сечения.

Геометрическая степень расширения определяется по формуле:

$$n_{\Gamma} = \frac{1}{q(\lambda)}, \quad (1.40)$$

где  $q(\lambda)$  – газодинамическая функция, которая имеет следующий вид:

$$q(\lambda) = \left(\frac{n+1}{2}\right)^{\frac{1}{n-1}} \left(1 - \frac{n-1}{n+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{n-1}} \lambda. \quad (1.41)$$

В газогенераторе после камеры сгорания есть сужающая часть, включающая в себя выходное сечение из ГГ. Для ее определения необходимо знать значение критического сечения. Так как в газогенераторе скорость течения газа дозвуковая, т.е. она не достигает значения в критическом сечении, то критического сечения нет. Расчет площади критики делается, чисто с точки зрения, для определения диаметра выходного сечения, значение которого меньше критического.

Площадь критического сечения определяется по формуле имеющей следующий вид:

$$F_{кр} = \frac{\dot{m}_{ГГ} \sqrt{R_{\Gamma} T_{\Gamma}}}{p_{ГГ} \alpha_{\gamma}}. \quad (1.42)$$

Диаметр сечения на выходе из ГГ находится из формулы площади окружности и имеет следующий вид:

$$d_{ar} = \sqrt{\frac{4F_{ar}}{\pi}}. \quad (1.43)$$

Длина сужающей части определяется по эмпирической формуле:

$$l_{суж} = 0,9(d_{\Gamma} - d_{ar}). \quad (1.44)$$

Результаты газодинамического расчета представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Газодинамические параметры ГГ

Параметр	Обозначение	Значения параметров
Скорость течения рабочего тела на выходе из ГГ, м/с	$w_a$	247,839
Относительная скорость потока продуктов сгорания	$\lambda$	0,439
Геометрическая степень расширения	$n_{\Gamma}$	1,558
Площадь сечения на выходе из ГГ, м <sup>2</sup>	$F_{a\Gamma}$	$4,51 \cdot 10^{-4}$
Диаметр выходного сечения, м	$d_{a\Gamma}$	0,024
Длина сужающей части ГГ, м	$l_{\text{суж}}$	0,045

#### 1.4.6 Расчет входного сечения для подвода компонентов топлива в ГГ

Площадь проходного сечения потока, а следовательно и диаметр проходного сечения, рассчитывается с помощью уравнения неразрывности. Данное уравнение имеет следующий вид:

$$(\rho u)_{\Gamma} = \frac{\dot{m}}{F_{\text{прох}}}, \quad (1.45)$$

где  $\rho_{\Gamma}$  – плотность компонента топлива;

$u_{\Gamma}$  – скорость потока компонента топлива;

$\dot{m}$  – расход потока компонента топлива в рассматриваемом сечении;

$F_{\text{прох}}$  – площадь проходного сечения потока.

Проходное сечение потока имеет форму круга. Формула площади проходного сечения имеет следующий вид:

$$F_{\text{прох}} = \pi \frac{d_{\text{прох}}^2}{4},$$

(1.46)

где  $d_{\text{прох}}$  – диаметр проходного сечения потока.

Проходное сечение коллекторов, трубопроводов подбирают исходя из допустимой скорости движения компонентов по трубам. Обычно скорость движения жидкости принимают равной 5...30 м/с [1].

Результаты произведенного расчета.

Значение скорости потока было выбрано из допустимого диапазона скоростей.

Для окислителя значение скорости потока равно  $u_{\text{ок}} = 10$  м/с, а для горючего –  $u_{\text{г}} = 9$  м/с.

Плотность компонентов топлива:

- окислителя – азотного тетраоксида –  $\rho_{\text{ок}} = 1440$  кг/м<sup>3</sup> ;
- горючего – несимметричного диметилгидразина –  $\rho_{\text{г}} = 790$  кг/м<sup>3</sup>.

Результаты расчета приведены в таблице 1.9.

Таблица 1.9 – Значения проходного сечения для подвода компонентов топлива

Параметр	Обозначение	Значения параметров
Диаметр проходного сечения, мм:		
окислителя	$d_{\text{ок}}$	20
горючего	$d_{\text{г}}$	5,093

## Заключение

Для определения параметров двухкомпонентного жидкостного неохлаждаемого окислительного ГГ с одноступенчатым подводом топлива, который работает на основных компонентах топлива, были получены основные значения параметров ГГ и произведены следующие расчеты:

- Термодинамический расчет, результатами которого являются коэффициент избытка окислителя  $\alpha_{ГГ} = 9,864$  и температура в ГГ  $T_{ГГ} = 1012,52$  К.

- Расчет расходов компонентов топлива через ГГ:  $\dot{m}_{ГГ} = 4,529 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ,  $\dot{m}_{\text{о.ГГ}} = 4,384$  кг/с,  $\dot{m}_{\text{г.ГГ}} = 0,145$  кг/с.

- Расчет по определению основных параметров работы основных агрегатов и давления в ГГ. Результатами этого расчета являются мощности турбины  $N_T = 1,043 \cdot 10^5$  Вт и насосов  $N_H = 1,03 \cdot 10^5$  Вт, давление в газогенераторе  $p_{ГГ} = 12,28$  МПа.

- Геометрический расчет. В результате были определены объем ГГ  $V_{ГГ} = 4,06 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>, диаметр  $D_r = 0,075$  м и длина  $L_r = 0,093$  м газогенератора, выбрана форма камеры сгорания ГГ, а также рассчитаны толщины камеры сгорания и смесительной головки ГГ  $\delta_{\text{ксГГ}} = 3$  мм и  $\delta_{\text{сф}} = 2$  мм.

- Газодинамический расчет. Результатами данного расчета являются скорость течения рабочего тела на выходе из ГГ  $w_a = 247,839$  м/с и диаметр сечения на выходе из ГГ  $d_{\text{ар}} = 0,024$  м.

- Расчет по определению входного сечения коллекторов, необходимых для подвода компонентов в смесительную головку. Результатами расчета являются значения диаметров проходного сечения окислителя  $d_{\text{ок}} = 20$  мм и горючего  $d_r = 5,093$  мм при заданных скоростях потоков продуктов.

## Список использованных источников

1. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учебник для высших учебных заведений. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2016. – 461 с.
2. Гахун Г.Г. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей: Уч. для студ. вузов. М.: Машиностроение, 1989. – 424 с.
3. Бабук В.А. Параметры продуктов сгорания в камере и на срезе сопла ракетного двигателя: метод-е указ-я к лаб.раб. Балт. гос. тех. ун-т. – СПб., 2007. – 18 с.
4. Ермолаев В.И. Двигательные установки космических летательных аппаратов: учебник. Балт. гос. тех. ун-т. – СПб., 2016. – 214 с.
5. Ермолаев В.И. Методы оптимизации праектных параметров маршевых двигательных установок и способов маневрирования космических аппаратов: учебник. Балт. гос. тех. ун-т. – СПб., 2017. – 80 с.
6. Гуртовой А.А. Расчет и конструирование агрегатов ЖРД: учеб. пособие. ФГБОУ ВО «Воронежский гос. тех.ун-т. – Воронеж, 2016. – 166 с.
7. Белов В.П. Тепловое проектирование ракетных двигателей: прак-е пособие. Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2016. – 43 с.