	МИНОБРНАУКИ РОССИИ федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)	
	БГТУ.СМК-Ф-4.2-К5-02	

Факультет

шифр \_\_\_\_\_ наименование \_\_\_\_\_

Кафедра

шифр \_\_\_\_\_ наименование \_\_\_\_\_

Дисциплина

\_\_\_\_\_

## КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

### на тему

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Выполнил студент группы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Фамилия И.О.

**РУКОВОДИТЕЛЬ**

\_\_\_\_\_

Фамилия И.О.


Подпись

Оценка \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

20 \_\_\_\_ г.

	МИНОБРНАУКИ РОССИИ
	федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)
	БГТУ.СМК-Ф-4.2-К5-03

УТВЕРЖДАЮ:

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

подпись

Фамилия И.О.

### З А Д А Н И Е

на курсовой проект по дисциплине \_\_\_\_\_

выполняемый в \_\_\_\_\_ семестре 20\_\_\_\_ - 20\_\_\_\_ уч. года

студенту \_\_\_\_\_

группы \_\_\_\_\_ факультета

1 Тема проекта \_\_\_\_\_

2 Дата выдачи задания \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

3 Сроки сдачи студентом оконченного проекта \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

4 Техническое задание \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Исходная технико-экономическая информация к проекту

5 Состав и объем проекта

5.1 Чертежи, схемы, диаграммы:

5.2 Программа расчетов на ЭВМ \_\_\_\_\_

5.3 Расчетно-пояснительная записка к проекту на \_\_\_\_\_ стр.

6 Календарный план выполнения курсового проекта

Этап	Краткое содержание	Срок выполнения	
		по плану	фактически

7 Дополнительные указания по проектированию \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

8 Отзыв руководителя \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

9 Общая оценка о работе студента \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 дата

Руководитель \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 дата

## РЕФЕРАТ

Курсовой проект «Обоснование облика ракетных двигателей с нагнетательной системой подачи» посвящен проведению анализа между двумя схемами ЖРД на трехкомпонентном топливе. В нем рассмотрены характеристики топливных компонентов, изложены основные вопросы по конструкции и особенностям РД, проведен энергетический расчет схем с дожиганием генераторного газа и без и на его основе выполнен анализ.

Работа состоит из пяти глав, введения и заключения общим объемом 30 страница. В работе содержится 11 таблиц, 6 иллюстраций.

Ключевые слова: *двигатель, пневмогидравлическая схема (ПГС), энергетический расчет, компоненты топлива, соотношение компонентов, давление, температура, массовый расход, тяга, удельный импульс.*

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1.ХАРАКТЕРИСТИКА ТОПЛИВНЫХ КОМПАНЕНТОВ .....	8
2. ОБЛИК ДВИГАТЕЛЯ .....	10
2.1 Вариант ЖРД с насосной системой питания открытого типа.....	10
2.1.1 ПГС открытой схемы.....	11
2.1.2 Запуск, работа и остановка двигателя. ....	12
2.2 ЖРД с НСП с дожиганием газогенераторного газа в камере.....	13
2.2.1 ПГС закрытой схемы. ....	15
2.2.2 Запуск, работа и остановка двигателя. ....	16
3.ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЖРДНА ТРЕХКОМПОНЕНТНОМ ТОПЛИВЕ С НСП ОТКРЫТОГО ТИПА .....	17
3.1 Зависимость удельного импульса камеры от коэффициента избытка окислителя.....	17
3.2 Параметры в газогенераторе.....	18
3.3 Зависимость удельного импульса двигательной установки от относительного расхода на привод ТНА. ....	18
3.5 Массовые расходы через двигатель. ....	24
3.6 Проверка баланса мощностей.....	25
4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЖРД ЗАКРЫТОЙ СХЕМЫ .....	26
4.1 Выбор параметров в газогенераторе.....	26
4.2 Выбор параметров в КС. ....	26
4.3 Определение оптимального давления в камере сгорания, перепада на турбине, расходных и энергетических характеристик. ....	26
4.4 Массовые расходы. ....	33

4.5 Проверка баланса мощностей.....	34
5. СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАССМАТРИВАЕМЫХ ВАРИАНТОВ ДВИГАТЕЛЯ.....	36
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	37
7. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	38

## ВВЕДЕНИЕ

### Цель работы.

Обоснование облика и режимных параметров ЖРД на трехкомпонентном топливе с системами питания открытого типа и с дожиганием генераторного газа в камере.

### Исходные данные.

Тяга двигателя: 600 [кН]

Компоненты топлива:

- Горючее:  $C_4H_{10}$  (бутан) +  $H_2$  (водород)
- Окислитель:  $O_2$  (жидкий кислород)

Давление на срезе сопла: 0,07 [МПа]

Относительная доля  $H_2$  в составе топлива в камере:  $\delta_{H_2} = 7,5\%$

### Анализ исходных данных.

В двигателе для повышения энергетических характеристик горючего делается добавка водорода.

Доля водорода в составе горючего оценивается через параметр  $\gamma_{H_2}$ .

$$\gamma_{H_2}' = \frac{m_{H_2}'}{m_{H_2}' + m_{yвг}'}$$

или же представим в такой форме:

$$\gamma_{H_2}' = \delta_{H_2}(K_m' + 1)$$

## 1.ХАРАКТЕРИСТИКА ТОПЛИВНЫХ КОМПАНЕНТОВ

**1. Горючее – бутан  $C_4H_{10}$** —органический газ имеет ярко выраженный специфический запах и относится к классу алканов. Это ядовитый газ, который очень опасен для человека и его вдыхание может привести к летальному исходу. Бутан хорошо растворим в растворителях органического происхождения, а также легко воспламенит и взрывоопасен. При концентрации бутана в воздухе 1,9 — 8,4 % от объема, может вызвать взрыв. ПДК300 мг/м<sup>3</sup>. Физические свойства бутана (T=293K) представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^5$	Температура кипения Тк, К	Температура плавления Тпл, К	Теплота испарения r, кДж/кг	Критическая температура Ткр, К	Критическое давление Ркр, МПа	Удельная теплоемкость, Дж/кг*К	Энтальпия, кДж/кг
580	6,97	272,5	134,6	38,62	425	3,747	1428	-2779,2

**2. Окислитель – жидкий кислород  $O_2$** — криогенная, интенсивно испаряющаяся при нормальной температуре, прозрачная, слегка голубовая жидкость без запаха.

Обладает хорошей текучестью, проникает в малые зазоры, что обуславливает хорошие смазывающие свойства. Химически стабилен.

Кислород считается не токсичным (ПДК – 0,87г/л.), не ядовитым, но длительное пребывание в его атмосфере не рекомендуется. Контакт с жидким кислородом может привести к обмороживанию. Например, прикосновение рукой к трубам, по которым течет жидкий кислород, может вызвать мгновенное примерзание кожного покрова руки к поверхности металла, результатом чего является длительно не заживающая рана.

Попадание жидкого кислорода на одежду может вызвать ее воспламенение, иногда со слабым взрывом, если одежда пропитана маслами нефтяного происхождения. Попадание жидкого кислорода на пористые материалы (с последующей их пропиткой), например, теплоизоляцию баков,



может привести к взрыву этих материалов при наличии ударного или теплового импульса.

Контакт жидкого кислорода с маслами нефтяного происхождения (солидол или тавот, автол, СУ и др.) всегда приводит к взрыву.

Все емкости и трубопроводы для кислорода должны перед заполнением обязательно тщательно обезжириваться спиртом, бензином, хладонами, четыреххлористыми углеводородами, и затем – продуваться подогретым до 700°C азотом.

Материалы для работы с жидким O<sub>2</sub>: высоколегированная сталь (1X18H10T), медь и ее сплавы.

Уплотняющие материалы: цветные металлы, фторопласт, асбест, винилпласт и специальные сорта резины.

Производится путем сжижения воздуха и испарения из него азота.

Теплоизоляция для емкости хранения (баки) вакуумная, экранно-вакуумная, порошковая, вакуумно-порошковая.

Суточные потери O<sub>2</sub> в больших транспортных емкостях (1-30 тонн) за счет дренирования составляет 3,6-7,5%.

Применяется с любым горючим. Физические свойства кислорода (T=90K) представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Динамическая вязкость $\mu \cdot 10^5$	Температура плавления Тк, К	Температура кипения Тпл, К	Теплота испарения r, кДж/кг	Критическая температура Ткр, К	Критическое давление Ркр, МПа	Удельная теплоемкость, Дж/кг*К	Энтальпия, кДж/кг
1135	19	54	90	214	154,3	5,004	1700	-398,3

## 2. ОБЛИК ДВИГАТЕЛЯ

### 2.1 Вариант ЖРД с насосной системой питания открытого типа.

В двигателях без дожигания генераторного газа (т.е. «открытой схемы»), после срабатывания на турбине, генераторный газ выбрасывается в окружающую среду через вспомогательные сопла, иногда являющиеся рулевыми. В данном случае для получения генераторного газа необходим запас вспомогательного топлива. Вследствие относительно низкой температуры генераторного газа и малой степени его расширения во вспомогательных соплах использование указанного запаса топлива для создания тяги оказывается малоэффективным. Поэтому для ЖРД с насосной системой подачи топлива без дожигания, характерно некоторое снижение экономичности в связи с затратами рабочего тела на привод ТНА.

При работе по открытой схеме тяга двигательной установки Р<sub>ду</sub> складывается из двух составляющих: тяги Р', создаваемой камерами двигателя и дополнительной тяги  $\Delta P_{\text{ТНА}}$ , возникающей вследствие истечения из патрубков ТНА рабочего тела привода ТНА.

Удельный импульс ДУ  $I_{\text{ду}}$  определяется как тяга установки, поделенная на полный расход компонентов, поступающих в камеру сгорания и затраченных на привод ТНА. Удельная тяга ДУ, работающей по открытой схеме меньше удельной тяги камеры двигателя вследствие менее эффективного использования компонентов, расходуемых на привод ТНА, т.к. температура и давление рабочего тела в патрубках значительно ниже, чем в камере сгорания. Соответственно степень использования рабочего тела при получении добавки тяги намного ниже, чем в камере ЖРД. Таким образом, хотя патрубки и дают некоторую дополнительную тягу, расходы при получении этой тяги непропорционально велики. При этом в зависимости от давления подачи и совершенства ТНА потеря удельной тяги составляет 2 - 3% от удельной тяги двигателей

### 2.1.1 ПГС открытой схемы.

ПГС открытой схемы представлена на рис.2.1.

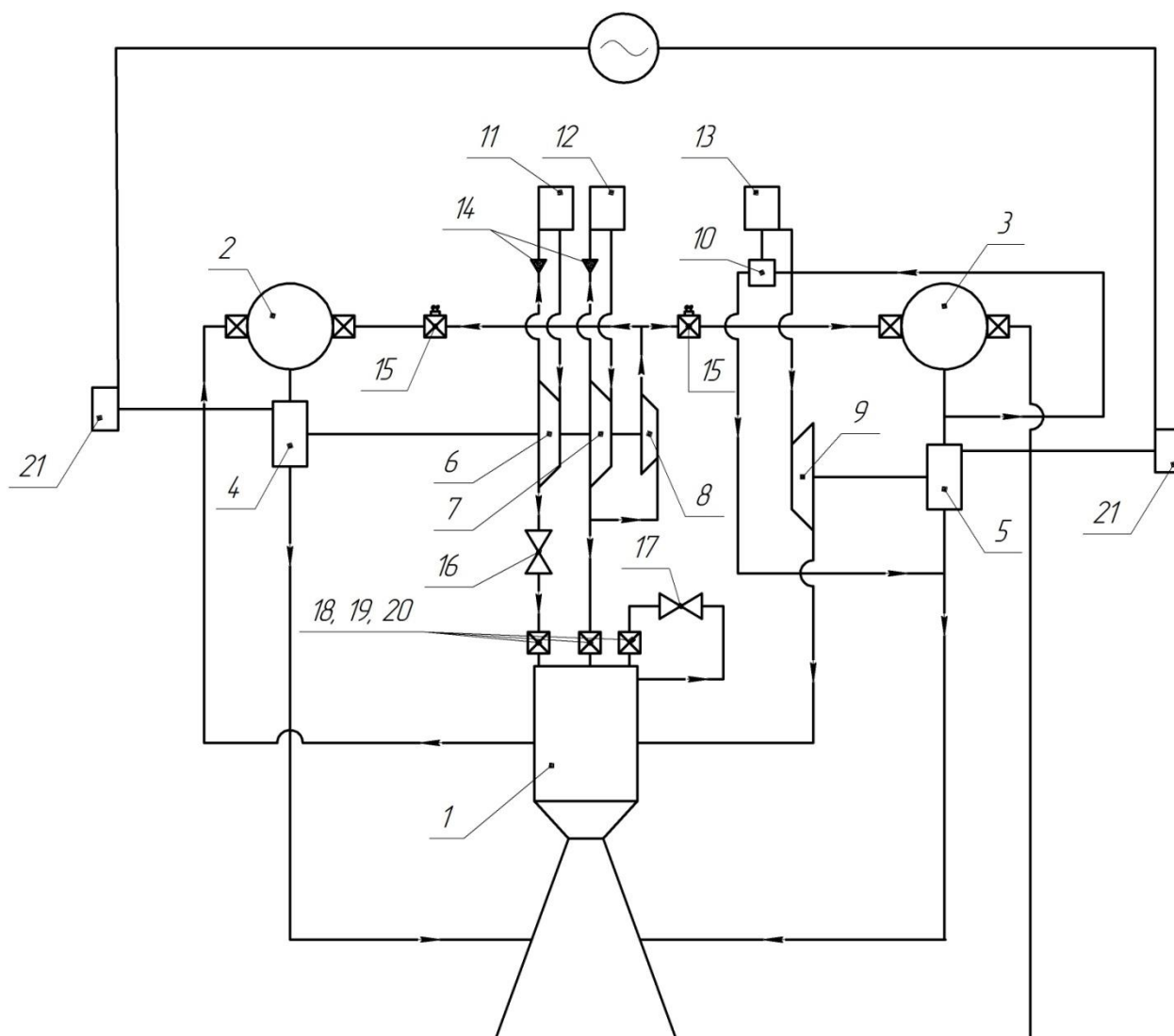


Рисунок 2.1 – ПГС открытой схемы

- 1 – КРД
- 2 – ГГ №1
- 3 – ГГ №2
- 4 – Турбина №1
- 5 – Турбина №2
- 6 – Насос УВГ
- 7 – Насос окислителя №1
- 8 – Насос окислителя №2

- 9 – Насос водорода
- 10 – Турбина №3
- 11 – Бустерный насос УВГ
- 12 – Бустерный насос окислителя
- 13 – Бустерный насос водорода
- 14 – Обратные клапана
- 15 – Регуляторы расхода
- 16 – Дроссель УВГ
- 17 – Дроссель водорода
- 18 – Форсунки УВГ
- 19 – Форсунки окислителя
- 20 – Форсунки водорода
- 21 – Пиростартеры

### **2.1.2 Запуск, работа и остановка двигателя.**

Запуск: Открывается отсечной клапан системы наддува. Происходит настройка РКС на номинальную тягу. Подается напряжение на пиростартеры (21). Импульс давления с пиростартеров подается на пиромембранные клапана, тем самым открывая магистрали УВГ, водорода и окислителя, компоненты поступают на насосы УВГ (6), водорода (9) и окислителя (7). Одновременно раскручиваются турбины (4 и 5) ТНА. Компоненты под давлением поступают в камеру сгорания и газогенераторы (2 и 3). Подается напряжение на ПЗУ в камере сгорания и в газогенераторах, газогенераторы выходят на штатный режим, пиростартеры отключаются. Двигатель выходит на штатный режим работы.

Работа двигателя на режиме (либо его изменение) поддерживается работой регуляторов от РКС и дросселями (16, 17).

Остановка происходит путем уменьшения подачи компонентов в газогенератор, далее перекрываются отсечные клапана магистралей, камеры и газогенератора, обеспечивая тем самым минимальный импульс

последствий и отсутствие гидроударов в системе. Компоненты не поступают в камеру сгорания и газогенератор, двигатель выключен. Повторного включения конструкция не предусматривает.

## **2.2 ЖРД с НСП с дожиганием газогенераторного газа в камере.**

В ДУ с дожиганием генераторного газа в камере (т.е. «замкнутая схема») отработавшее в турбине рабочее тело поступает в камеру сгорания, где происходит его догорание при оптимальном соотношении восстановительных и окислительных элементов. При этом характерные для ДУ открытой схемы потери тяги за счет нерационального расхода компонентов на привод турбины отсутствуют - удельная тяга ДУ с замкнутой схемой равна удельной тяге камеры двигателя. Таким образом, в двигательных установках с замкнутой схемой более полно используется для создания тяги химическая энергия всего топлива, имеющегося на борту ракеты. Применение замкнутой схемы не только повышает удельный импульс ДУ по сравнению с  $I_{уд}$  установки с открытой схемой, но и дает возможность дальнейшего увеличения  $I_{уд}$  за счет увеличения давления в камере. В зависимости от состояния, в котором компоненты подаются в камеру сгорания, различают два типа замкнутых схем: «газ+жидкость» и «газ+газ». При схеме «газ+жидкость» один из компонентов, окислитель или горючее, полностью поступает в ГГ, где и сгорает с частью второго компонента (соответственно при  $\alpha > 1$  или  $\alpha < 1$ ). Образовавшиеся газообразные продукты сгорания с большим избытком окислительных или восстановительных элементов идут на привод турбины ТНА и затем по газоводу поступают в камеру сгорания. Второй компонент поступает в камеру сгорания в жидком виде. Основным уравнением, позволяющим при заданном давлении в камере сгорания определить давление в ГГ, необходимое для привода ТНА, а следовательно, и

необходимое давление подачи, является уравнение баланса мощностей, потребляемой насосами и развиваемой турбиной:

$$N_T = \sum N_H$$

С увеличением  $P_k$  возрастает необходимое давление подачи, т.е. возрастает мощность, потребляемая насосами. Соответственно должна увеличиваться и мощность турбины  $N_T$ , необходимая для привода насосов. Таким образом, при замкнутой схеме двигательной установки существует предельно возможное давление в камере сгорания  $P_{kmax}$ . Величина этого давления определяется свойствами рабочего тела:  $(RT)^\circ$ ,  $n$ , КПД насосов и турбины, потерями в трактах и типом применяемого ГГ (окислительный или восстановительный).

### 2.2.1 ПГС закрытой схемы.

ПГС закрытой схемы представлена на рис. 2.2

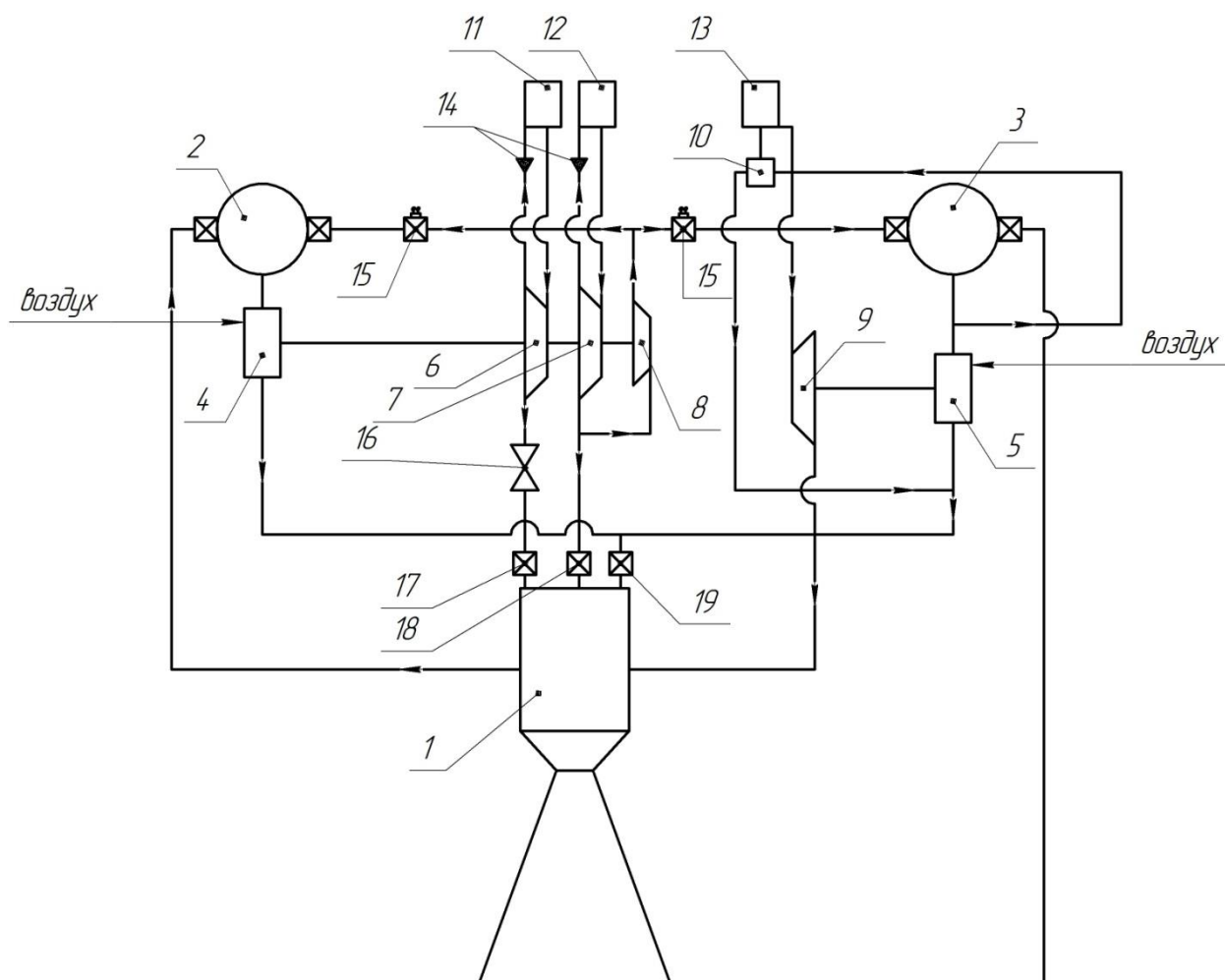


Рисунок 2.2 – ПГС закрытой схемы

- 1 – КРД
- 2 – ГГ №1
- 3 – ГГ №2
- 4 – Турбина №1
- 5 – Турбина №2
- 6 – Насос УВГ
- 7 – Насос окислителя №1
- 8 – Насос окислителя №2
- 9 – Насос водорода
- 10 – Турбина №3

- 11 – Бустерный насос УВГ
- 12 – Бустерный насос окислителя
- 13 – Бустерный насос водорода
- 14 – Обратные клапана
- 15 – Регуляторы расхода
- 16 – Дроссель УВГ
- 17 – Форсунки УВГ
- 18 – Форсунки окислителя
- 19 – Форсунки для генераторного газа

### **2.2.2 Запуск, работа и остановка двигателя.**

Запуск: Открывается отсечной клапан системы наддува. Происходит настройка РКС и СОБ на номинальный режим. Подается воздух от наземной установки для первичной раскрутки турбин (4 и 5), раскручиваются валы ТНА. Подается напряжение на ЭПК, тем самым открывая магистрали горючего и окислителя, компоненты поступают в магистрали. Открываются отсечные клапана. Окислитель поступает в газогенераторы (2 и 3); водород – в газогенераторы (2 и 3) и охлаждающий тракт, УВГ – в камеру сгорания. Подается напряжение на ПЗУ в газогенераторах, восстановительный газ, через турбины (2, 3, 10), подается в камеру сгорания. Газогенератор выходит на режим, подача воздуха на турбины (4 и 5) прекращается. Срабатывает ПЗУ в камере сгорания, двигатель выходит на рабочий режим.

Работа двигателя на режиме (либо его изменение) поддерживается работой регулятора расхода (15) в ГГ и дросселем.

Остановка происходит тем же путем, что и в открытой схеме.



### 3.ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЖРДНА ТРЕХКОМПОНЕНТНОМ ТОПЛИВЕ С НСП ОТКРЫТОГО ТИПА

В энергетическом расчете систем открытого типа первоочередной задачей является определение потерь удельного импульса в результате затрат на привод ТНА. Величину потерь характеризует коэффициент  $\xi$  (относительный расход в ГГ).

#### 3.1 Зависимость удельного импульса камеры от коэффициента избытка окислителя.

Для разного массового соотношения компонентов в камере  $K'_m$  определяется оптимальный коэффициент избытка окислителя и соответствующий ему удельный импульс.

Зависимость приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1

$K'_m$	$\alpha$	Иуд, м/с
При $P_k = 5$ МПа		
2,2	0,86	3479
2,5	0,86	3480
2,7	0,86	3481
3	0,86	3483
3,2	0,86	3484
при $P_k = 10$ МПа		
2,2	0,85	3400
2,5	0,84	3402
2,7	0,84	3402
3	0,84	3404
3,2	0,84	3405
При $P_k = 15$ МПа		
2,2	0,8	3252
2,5	0,8	3253
2,7	0,8	3254

$K'_m$	$\alpha$	Гуд, м/с
3	0,8	3256
3,2	0,8	3257

Как видим, с ростом массового соотношения компонентов растет удельный импульс, а коэффициент избытка окислителя ( в пределах одного давления) остается постоянным.

Для дальнейших расчетов выбираем  $K'_m = 3$ .

### 3.2 Параметры в газогенераторе.

Газогенератор восстановительного типа, за счет этого можно обеспечить высокую работоспособность газа на турбине (табл. 3.2)

Таблица 3.2

Т", К	R", Дж/кг*К	$K_m''$	n
1085,5	1953,6	1,11	1,35

### 3.3 Зависимость удельного импульса двигательной установки от относительного расхода на привод ТНА.

**Ход расчета.**

Базовая система уравнений

$$\begin{aligned}
 1) \quad N_{\dot{m}}^{ок} &= N_{\dot{m}}^{ок} \Rightarrow g_{ок}^{\dot{m}} = \psi_{ок}^{\dot{m}} \frac{1}{\eta_{\dot{m}}^{ок} \eta_{\dot{m}}^{ок}} ; \\
 2) \quad N_{\dot{m}}^{гор} &= N_{\dot{m}}^{гор} \Rightarrow g_{ок}^{\dot{m}} = \psi_{\dot{m}}^{гор} \frac{1}{\eta_{\dot{m}}^{гор} \eta_{\dot{m}}^{гор}} ; \\
 3) \quad N_{m_1} &= N_H^{ок1} + N_H^{ок2} + N_H^{y62} ; \\
 4) \quad N_{m_2} &= N_H^{H_2} ; \\
 5) \quad N_{m_3} &= N_{\dot{m}}^{H_2} .
 \end{aligned}$$

Принимаем, что  $\pi_{T1} = \pi_{T2} = \pi_{T3} = \pi_T$

Уравнение (5)  $N_{m_3} = N_{\delta H}^{H_2}$  может быть переписано как:

$$\dot{m}_{pm}^{m_3} L_{a\delta} \eta_{m_3} = \frac{1}{\rho_{H_2} \eta_{\delta H}^{H_2}} \dot{m}_{H_2}^{\delta H} \Delta p_{\delta H}^{H_2} = \frac{1}{\rho_{H_2} \eta_{\delta H}^{H_2}} \dot{m}_{H_2}^{\delta H} \psi_{\delta H}^{H_2} \Delta p_H^{H_2}$$

или

$$\xi \dot{m}_{\Sigma} \cdot \varphi \cdot \alpha \cdot L_{a\delta} \eta_{m_3} = \frac{1}{\rho_{H_2} \eta_{\delta H}^{H_2}} \dot{m}_{H_2}^H \psi_{\delta H}^{H_2} \Delta p_H^{H_2}$$

Уравнение (4)  $N_{m_2} = N_H^{H_2}$  в свою очередь переписывается

$$\xi \dot{m}_{\Sigma} \cdot \varphi \cdot (1 - \alpha) \cdot L_{a\delta} \eta_{m_2} = \frac{1}{\rho_{H_2} \eta_H^{H_2}} \dot{m}_{H_2}^H \Delta p_H^{H_2}$$

В предположении, что  $\eta_{m_2} \approx \eta_{m_3}$  и  $\eta_H^{H_2} \approx \eta_{\delta H}^{H_2}$ , поделив выражения уравнений (5) и (4) получим:

$$\alpha / (1 - \alpha) = \psi_{\delta H}^{H_2}$$

или

$$\alpha = \psi_{\delta H}^{H_2} / (1 + \psi_{\delta H}^{H_2})$$

Теперь суммируем выражения уравнений (4) и (5):

$$\begin{aligned} \xi \dot{m}_{\Sigma} \cdot \varphi L_{a\delta} \eta_m &= \frac{1}{\rho_{H_2} \eta_H^{H_2}} m_{\Sigma} \cdot \left( \delta_{H_2} + \xi \frac{1}{k_m + 1} \right) \Delta p_H^{H_2} + \\ &+ \frac{1}{\rho_{H_2} \eta_H^{H_2}} m_{\Sigma} \cdot \left( \delta_{H_2} + \xi \frac{1}{k_m + 1} \right) \Delta p_H^{H_2} \psi_{\delta H}^{H_2} \end{aligned}$$

или

$$\xi \varphi L_{a\delta} \eta_m = \frac{1}{\rho_{H_2} \eta_H^{H_2}} \left( \delta_{H_2} + \xi \frac{1}{k_m + 1} \right) \Delta p_H^{H_2} (1 + \psi_{\delta H}^{H_2})$$

Получаем на выходе,

$$\xi^* = \frac{\delta_{H_2} \Delta p_H^{H_2} (1 + \psi_{\delta H}^{H_2})}{\rho_{H_2} \eta_H^{H_2} \left( \varphi L_{a0} \eta_m - \frac{1}{k_m'' + 1} \Delta p_H^{H_2} (1 + \psi_{\delta H}^{H_2}) - \frac{1}{\rho_{H_2} \eta_H^{H_2}} \right)}$$

Рассмотрим уравнение (3)  $N_{m_1} = N_H^{OK_1} + N_H^{OK_2} + N_H^{y_{62}}$  системы, которое запишем в виде:

$$\begin{aligned} \xi(1 - \varphi) L_{a0} \eta_m &= \frac{1}{\rho_{OK_1} \eta_H^{OK_1}} \left( \frac{k_m'}{k_m' + 1} + \xi \frac{k_m''}{k_m'' + 1} \right) (1 + g_{OK}^{\delta m}) \Delta p_H^{OK_1} + \\ &+ \frac{1}{\rho_{OK_2} \eta_H^{OK_2}} \xi \frac{k_m''}{k_m'' + 1} \Delta p_H^{OK_2} + \\ &+ \frac{1}{\rho_{y_{62}} \eta_H^{y_{62}}} \frac{1}{k_m' + 1} (1 - \gamma_{H_2}) (1 + g_{y_{62}}^{\delta m}) \Delta p_H^{y_{62}} \end{aligned}$$

откуда

$$\xi^{**} = \frac{A}{B}$$

Здесь:

$$A = \frac{1}{\rho_{OK_1} \eta_H^{OK_1}} \frac{k_m'}{k_m' + 1} (1 + g_{OK}^{\delta m}) \Delta p_H^{OK_1} + \frac{1}{\rho_{y_{62}} \eta_H^{y_{62}}} \frac{1}{k_m' + 1} (1 - \gamma_{H_2}) (1 + g_{y_{62}}^{\delta m}) \Delta p_H^{y_{62}},$$

$$\begin{aligned} B &= (1 - \varphi) L_{a0} \eta_m - \frac{1}{\rho_{OK_1} \eta_H^{OK_1}} \frac{k_m''}{k_m'' + 1} (1 + g_{OK}^{\delta m}) \Delta p_H^{OK_1} - \\ &- \frac{1}{\rho_{OK_2} \eta_H^{OK_2}} \frac{k_m''}{k_m'' + 1} \Delta p_H^{OK_2} \end{aligned}$$

Здесь определяющие величины  $A$  и  $B$  потребные уровни перепадов насосов  $\Delta p_H^{OK_1}$ ,  $\Delta p_H^{OK_2}$ ,  $\Delta p_H^{y_{62}} = f(p_k)$ .

Полученные зависимости  $\xi^*$  и  $\xi^{**}$  образуют систему двух линейных независимых уравнений относительно трёх неизвестных  $\xi$ ,  $\varphi$  и  $P_k$ . Если определим  $P_k$  конкретным значением, система замыкается. Получаем зависимости  $\xi, \varphi = f(p_k)$  из которых сможем получить оптимальные параметры работы двигателя.

В расчете обозначениями обозначены следующие величины:

$g_r$  – относительный расход для питания бустерного насоса горючего;

$\pi_T$  – относительный перепад давления на турбине;

$\dot{m}'_\Sigma$  – суммарный расход компонентов через двигатель;

$\xi$  – относительная доля генераторного газа (ГГ) в составе топлива ЖРД;

$\varphi$  – относительная доля ГГ, расходуемого для привода ТНА-2 и ТНА-3 (гидротурбины 2 и 3);

$\alpha$  – доля ГГ на привод турбины ТНА-3 в суммарном расходе ГГ на турбины ТНА-2 и ТНА-3;

$L_{ад}$  – адиабатная работа на турбине;

$\eta_t$  – КПД турбины;

$\eta_n$  – КПД насоса;

$\rho$  – плотность компонента;

$\Psi_{бн}$  – относительный напор бустерного насоса;

$K'_m$  – соотношение топливных компонентов в камере сгорания.

$K''_m$  – соотношение топливных компонентов в газогенераторе.

Для решения принимаем следующие значения:

Параметр	Значение
Перепад на форсунках	0,5 МПа

Параметр	Значение
Перепад на регуляторе, стабилизаторе, дросселе	0,2Рк МПа
Перепад на магистралях	0,6 МПа
Перепад в тракте охлаждения	0,3Рк МПа
Перепад на бустерных насосах	0,8 МПа
Давление в баках	0,3 МПа
КПД насоса окислителя	0,7
КПД насоса горючего	0,6
КПД турбины	0,8
КПД бустерных насосов	0,7
КПД бустерных турбин	0,7
Плотность С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub>	580 кг/м <sup>3</sup>
Плотность О <sub>2</sub> на 1 насосе	1140 кг/м <sup>3</sup>
Плотность О <sub>2</sub> на 2 насосе	1140 кг/м <sup>3</sup>
Плотность Н <sub>2</sub>	70,76 кг/м <sup>3</sup>

Получаем зависимость удельного импульса двигателя от  $\xi$  при соответствующих значениях  $\varphi$  и разных давлениях (табл. 3.3; рис. 3.1):

$$I_{уд}^{дв} = \frac{I_{уд}^{кс}}{1 + \xi}$$

Таблица 3.3

Рк	$\xi$	$\varphi$	I уд кс	Iуд дв
5	0,0068	0,460	3259,6	3172,7
6	0,0080	0,466	3300,2	3208,6
7	0,0091	0,472	3333,5	3237,3
8	0,0103	0,477	3361,8	3261,1
9	0,0114	0,481	3386,0	3280,7

$P_k$	$\xi$	$\varphi$	$I_{уд\text{ кс}}$	$I_{уд\text{ дв}}$
10	0,0126	0,484	3407,6	3297,8
11	0,0138	0,488	3426,4	3312,1
12	0,0150	0,491	3443,7	3325,0
13	0,0162	0,494	3459,2	3336,0
14	0,0174	0,496	3473,4	3345,7
15	0,0186	0,499	3486,5	3354,3
16	0,0199	0,501	3498,6	3361,9
17	0,0211	0,504	3509,9	3368,6
18	0,0223	0,506	3520,4	3374,6
19	0,0236	0,508	3529,9	3379,5
20	0,0249	0,510	3539,4	3384,4

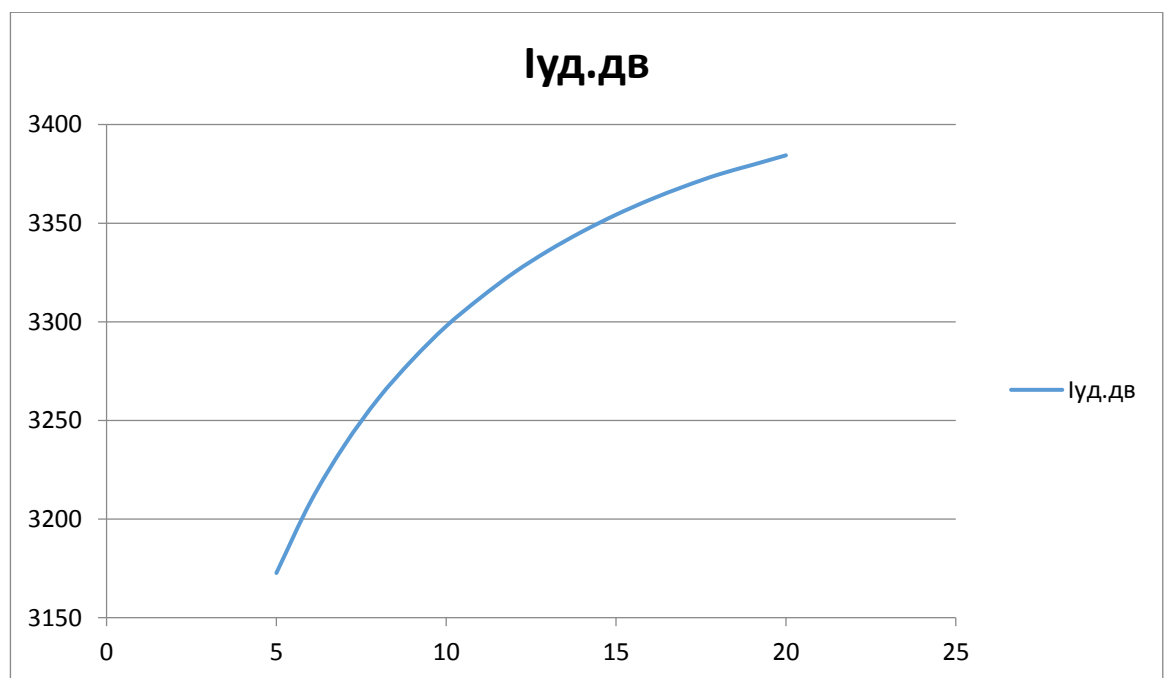


Рисунок 3.1 – Зависимость удельного импульса от  $\xi$

Поскольку видно, что точка максимума лежит в области давления выше 20 МПа, то дальше проводить ее поиск не имеет смысла. Рабочее давления для камеры сгорания принимаем равным 17 МПа. При  $P_k = 17$

МПа:  $\xi=0,0211$  и  $\varphi = 0,504$ . При таких параметрах достигается удельный импульс двигателя  $I_{уд}^{дв} = 3313$  м/с.

### 3.5 Массовые расходы через двигатель.

Суммарный расход топлива в двигатель:

$$\dot{m}_{\Sigma} = \frac{P}{I_{уд}^{дв}} = 178,114 \text{ кг/с} ;$$

Суммарный массовый расход в КС:

$$\dot{m}'_{\Sigma} = \frac{\dot{m}_{\Sigma}}{1+\xi} = 174,434 \text{ кг/с}$$

Массовый расход УВГ в КС:

$$\dot{m}'_{увг} = \frac{\dot{m}'_{\Sigma}(1-\gamma_{H_2})}{1+K'_m} = 30,526 \text{ кг/с} ;$$

Массовый расход окислителя в КС:

$$\dot{m}'_{ок} = \frac{\dot{m}'_{увг}K'_m}{1-\gamma_{H_2}} = 130,825 \text{ кг/с} ;$$

Массовый расход водорода в КС:

$$\dot{m}'_{H_2} = \frac{\gamma_{H_2}\dot{m}'_{увг}}{1-\gamma_{H_2}} = 13,083 \text{ кг/с} ;$$

Суммарный массовый расход в ГГ:

$$\dot{m}''_{\Sigma} = \dot{m}'_{\Sigma} * \xi = 3,681 \text{ кг/с} ;$$

Массовый расход водорода в ГГ:

$$\dot{m}''_{H_2} = \frac{\dot{m}''_{\Sigma}}{K''_m+1} = 1,744 \text{ кг/с} ;$$

Массовый расход окислителя в ГГ:

$$\dot{m}''_{ок} = \dot{m}''_{\Sigma} - \dot{m}''_{H_2} = 1,936 \text{ кг/с}$$



### 3.6 Проверка баланса мощностей.

Мощности насосов и турбин.

Мощность насоса УВГ:

$$N_{\text{H}}^{\text{УВГ}} = m'_{\Sigma} \frac{1}{\rho_{\text{УВГ}} \eta_{\text{H}}^{\text{УВГ}}} \frac{1}{K'_m + 1} (1 - \gamma_{\text{H2}}) (1 + g_{\text{бТ}}^{\text{УВГ}}) \Delta p_{\text{H}}^{\text{УВГ}} = 3289036 \text{ Вт} ;$$

Мощность первого насоса окислителя:

$$N_{\text{H1}}^{\text{OK}} = m'_{\Sigma} \frac{1}{\rho_{\text{OK1}} \eta_{\text{H1}}^{\text{OK}}} \left( \frac{K'_m}{K'_m + 1} + \xi \frac{K''_m}{K''_m + 1} \right) (1 + g_{\text{бТ}}^{\text{OK}}) \Delta p_{\text{H1}}^{\text{OK}} = 4467803 \text{ Вт} ;$$

Мощность второго насоса окислителя:

$$N_{\text{H2}}^{\text{OK}} = m'_{\Sigma} \frac{1}{\rho_{\text{OK2}} \eta_{\text{H2}}^{\text{OK}}} \xi \frac{K''_m}{K''_m + 1} \Delta p_{\text{H2}}^{\text{OK}} = 56468 \text{ Вт} ;$$

Мощность на валу турбины:

$$N_{\text{T1}} = m'_{\Sigma} (1 - \varphi) \xi L_{\text{ад}} \eta_{\text{T}} = 7813307 \text{ Вт} ;$$

Проверка баланса мощностей на первой турбине:

$$\delta_1 = \frac{N_{\text{T1}} - N_{\text{H}}^{\text{УВГ}} - N_{\text{H1}}^{\text{OK}} - N_{\text{H2}}^{\text{OK}}}{N_{\text{T1}}} = 0,019 ;$$

Мощность насоса водорода:

$$N_{\text{H}}^{\text{H2}} = m'_{\Sigma} \frac{1}{\rho_{\text{H2}} \eta_{\text{H}}^{\text{H2}}} \left( \delta_{\text{H2}} + \xi \frac{1}{K''_m + 1} \right) \Delta p_{\text{H}}^{\text{H2}} = 7842685 \text{ Вт} ;$$

Мощность второй турбины:

$$N_{\text{T2}} = \xi m'_{\Sigma} \varphi (1 - \alpha) L_{\text{ад}} \eta_{\text{T}} = 7849449 \text{ Вт} ;$$

Проверка баланса мощностей на первой турбине:

$$\delta_2 = \frac{N_{\text{T2}} - N_{\text{H}}^{\text{H2}}}{N_{\text{T1}}} = 0,001 .$$

## 4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЖРД ЗАКРЫТОЙ СХЕМЫ

### 4.1 Выбор параметров в газогенераторе.

В ДУ закрытого типа используем тот же восстановительный газогенератор. Весь расход водорода проходит через тракт охлаждения, газогенератор и турбину.

Параметры газогенератора оставляем теми же, что были рассмотрены в открытой схеме. Параметры приведены в табл. 4.1

Таблица 4.1

$K_m''$	$R, \text{Дж/кг}\cdot\text{K}$	$T, \text{K}$	$n$
1,11	1953,6	1085,5	1,35

### 4.2 Выбор параметров в КС.

Коэффициент массового избытка окислителя оставляем тем же, что был рассмотрен в открытой схеме.

Принимаем в камере сгорания  $\alpha=0,14$ ,  $K_m'=3$

### 4.3 Определение оптимального давления в камере сгорания, перепада на турбине, расходных и энергетических характеристик.

Предполагаем, что коэффициенты полезного действия турбин и перепады давлений на турбинах одинаковы.

Равновелики КПД насосов углеводородного топлива, водорода и кислорода;  $K_m''$  для двух газогенераторов одинакова.

Относительные напоры бустерных насосов будем принимать равными (табл. 4.2):

Таблица 4.2

$\Psi_{\text{бн}}^{\text{УВГ}}$	$\Psi_{\text{бн}}^{\text{H}_2}$	$\Psi_{\text{бн}}^{\text{OK}}$
0,0675	0,017	0,08

### Ход расчета.

#### Система уравнений:

- (1)  $N_{\text{бт}}^{\text{ок}} = N_{\text{бн}}^{\text{ок}};$
- (2)  $N_{\text{бт}}^{\text{убг}} = N_{\text{бн}}^{\text{убг}};$
- (3)  $N_{\text{т3}} = N_{\text{бн}}^{\text{H2}};$
- (4)  $N_{\text{т2}} = N_{\text{бн}}^{\text{H2}};$
- (5)  $N_{\text{т1}} = N_{\text{н}}^{\text{ок1}} + N_{\text{н}}^{\text{ок2}} + N_{\text{н}}^{\text{убг}}$

На базе уравнений (1) и (2) устанавливаем, что

$$g_o^{\text{бт}} = \psi_o^{\text{бт}} / (\eta_{\text{бн}}^o \eta_{\text{бт}}^o), \quad g_{\text{убг}}^{\text{бт}} = \psi_{\text{убг}}^{\text{бт}} / (\eta_{\text{бн}}^{\text{убг}} \eta_{\text{бт}}^{\text{убг}})$$

Рассмотрим уравнение (3).

Представим его в виде:

$$\begin{aligned} N_{\text{т3}} &= \chi_{\text{н2}} \dot{m}_{\Sigma} \delta_{\text{н2}} \varphi \alpha (1 + k_m) L_{\text{ад}} \eta_m = \\ &= N_{\text{бн}}^{\text{H2}} = \frac{1}{\rho_{\text{н2}} \eta_{\text{бн}}^{\text{H2}}} \dot{m}_{\Sigma} \delta_{\text{н2}} \Delta p_{\text{бн}}^{\text{H2}} \end{aligned}$$

или же

$$\chi_{\text{н2}} \varphi \alpha (1 + k_m) L_{\text{ад}} \eta_m = \frac{1}{\rho_{\text{н2}} \eta_{\text{бн}}^{\text{H2}}} \psi_{\text{бн}}^{\text{H2}} \Delta p_{\text{н}}^{\text{H2}}$$

Уравнение (4), в свою очередь, представим в таком виде:

$$\begin{aligned} N_{\text{т2}} &= \chi_{\text{н2}} \dot{m}_{\Sigma} \delta_{\text{н2}} \varphi (1 - \alpha) (1 + k_m) L_{\text{ад}} \eta_m = \\ &= N_{\text{н}}^{\text{H2}} = \frac{1}{\rho_{\text{н2}} \eta_{\text{н}}^{\text{H2}}} \dot{m}_{\Sigma} \delta_{\text{н2}} \Delta p_{\text{н}}^{\text{H2}} \end{aligned}$$

или

$$\chi_{\text{н2}} \varphi (1 - \alpha) (1 + k_m) L_{\text{ад}} \eta_m = \frac{1}{\rho_{\text{н2}} \eta_{\text{н}}^{\text{H2}}} \Delta p_{\text{н}}^{\text{H2}}$$

Рассматривая  $\eta_{\text{бн}}^{\text{H2}} \approx \eta_{\text{н}}^{\text{H2}}$ ,  $\eta_{\text{т2}} \approx \eta_{\text{т3}} \approx \eta_{\text{т}}$  и поделив выражения (3) и (4) уравнения, получим, что:

$$\alpha/(1-\alpha) = \psi_{\delta H}^{H_2}$$

или же в другом виде:

$$\alpha = \frac{\psi_{\delta H}^{H_2}}{1 + \psi_{\delta H}^{H_2}}$$

При известном  $\psi_{\delta H}^{H_2}$  величина  $\alpha$  также становится известна.

Снова рассмотрим уравнение (4).

$$\chi_{H_2} \delta_{H_2} \varphi (1-\alpha)(1+k_m'')L_{ad}\eta_m = \frac{1}{\rho_{H_2} \eta_{H_2}^{H_2}} \delta_{H_2} \left( p_{вых}^{H_2} - p_{вх}^{\delta H_2} \right) \frac{1}{1 + \psi_{\delta H}^{H_2}}$$

Если  $p_{k1}$  - давление в камере сгорания, то потребное давление на выходе из насоса  $H_2$ , то необходимое давление на выходе из насоса:

$$p_{вых}^{H_2} = \left( p_{k1} + \Delta p_{\phi}^{H_2} + \Delta p_m + \Delta p_{\phi}^{H_2} + \Delta p_{mag}^{H_2} + \Delta p_{mp}^{охл} \right)$$

Если перепады давления  $\Delta p_{тр}^{охл}$  и  $\Delta p_T$  оценивать зависимостями  $\Delta p_{тр}^{охл} = C_{тр}^{охл} * p_k$  и  $\Delta p_T = \pi_T (p_k + \Delta p_{\phi}^{H_2}) - (p_k + \Delta p_{\phi}^{H_2})$ , то выражение для уравнения (4) может быть представлено в виде

$$\chi_{H_2} \varphi (1-\alpha)(1+k_m'')L_{ad}\eta_m = \frac{1}{\rho_{H_2} \eta_{H_2}^{H_2}} \cdot \left( \pi_m (p_{k1} + \Delta p_{\phi}^{H_2}) + \Delta p_{\phi}^{H_2} + \Delta p_{mag}^{H_2} + C_{mp}^{охл} p_{k1} - p_{вх}^{\delta H_2} \right) \frac{1}{1 + \psi_{\delta H}^{H_2}}$$

Выразим отсюда  $p_{k1}$ :

$$p_{k1} = \frac{\chi_{H_2} \varphi (1-\alpha)(1+K_m'')L_{ад}\eta_T - \frac{1}{\rho_{H_2} \eta_{H_2}^{H_2}} \frac{1}{1+\psi_{\delta H}^{H_2}} (\pi_T \Delta p_{\phi}^{H_2'} + \Delta p_{\phi}^{H_2''} + \Delta p_{mag}^{H_2} - p_{вх.н}^{H_2})}{\frac{1}{\rho_{H_2} \eta_{H_2}^{H_2}} \frac{1}{1+\psi_{\delta H}^{H_2}} (\pi_T + C_{тр}^{охл})}$$

получаем функциональную зависимость

$$p_{k1} = f_1(\pi_m, \varphi).$$

Уравнение (5) представим в виде:

$$\begin{aligned} \chi_{H2} \delta_{H2} (1 + K_m'') (1 - \varphi) L_{ад} \eta_T = \\ = \frac{1}{\rho_{ок1} \eta_{H1}^{ок}} \frac{K_m'}{K_m' + 1} \frac{1 + g_{6T}^{ок}}{1 + \Psi_{6H}^{ок}} (p_{вых.H1}^{ок} - p_{вх.H1}^{ок}) \\ + \frac{\chi_{H2} \delta_{H2}}{\rho_{ок2} \eta_{H2}^{ок}} K_m'' (p_{вых.H2}^{ок} - p_{вх.H2}^{ок}) + \frac{1 - \chi_{H2}}{\rho_{убг} \eta_H^{убг}} \frac{1 + g_{6T}^{ок}}{1 + \Psi_{6H}^{ок}} \frac{1}{K_m' + 1} (p_{вых.H}^{убг} - p_{вх.H}^{убг}) \end{aligned}$$

Здесь, в предположении, что  $p_K = p_{K2}$ :

$$\begin{aligned} p_{вых.H1}^{ок} &= p_{K2} + \Delta p_{\phi}^{ок'} + \Delta p_{маг}^{ок'}; p_{вх.H1}^{ок} = p_{вх}^{ок} + \Delta p_{6H}^{ок} \\ p_{вых.H2}^{ок} &= \pi_T (p_{K2} + \Delta p_{\phi}^{ок'}) + \Delta p_{\phi}^{ок''} + \Delta p_{маг}^{ок''} + C_{рег}^{ок} * p_{K2}; p_{вх.H2}^{ок} = p_{вых.H1}^{ок} \\ p_{вых.H}^{убг} &= p_{K2} + \Delta p_{\phi}^{убг} + \Delta p_{маг}^{убг} + C_{дрок}^{убг} * p_{K2}; p_{вх.H}^{убг} = p_{вх}^{убг} + \Delta p_{6H}^{убг} \end{aligned}$$

Иными словами, все это может быть преобразовано к виду

$$\begin{aligned} \chi_{H2} \delta_{H2} (1 + K_m'') (1 - \varphi) L_{ад} \eta_T = \\ = \frac{1}{\rho_{ок1} \eta_{H1}^{ок}} \frac{K_m'}{K_m' + 1} \frac{1 + g_{6T}^{ок}}{1 + \Psi_{6H}^{ок}} (p_{K2} + \Delta p_{\phi}^{ок'} + \Delta p_{маг}^{ок'} - p_{вх}^{ок} - \Delta p_{6H}^{ок}) \\ + \frac{\chi_{H2} \delta_{H2}}{\rho_{ок2} \eta_{H2}^{ок}} K_m'' \left( \pi_T (p_{K2} + \Delta p_{\phi}^{ок'}) + \Delta p_{\phi}^{ок''} + \Delta p_{маг}^{ок''} + C_{рег}^{ок} * p_{K2} - (p_{K2} + \Delta p_{\phi}^{ок'} \right. \\ \left. + \Delta p_{маг}^{ок'}) \right) \\ + \frac{1 - \chi_{H2}}{\rho_{убг} \eta_H^{убг}} \frac{1 + g_{6T}^{ок}}{1 + \Psi_{6H}^{ок}} \frac{1}{K_m' + 1} (p_{K2} + \Delta p_{\phi}^{убг} + \Delta p_{маг}^{убг} + C_{дрок}^{убг} * p_{K2} - p_{вх}^{убг} - \Delta p_{6H}^{убг}) \end{aligned}$$

и, далее, выразим  $p_{K2}$  как:

$$p_{K2} = \frac{A}{B}$$

где:

$$\begin{aligned} A &= \chi_{H2} \delta_{H2} (1 + K_m'') (1 - \varphi) L_{ад} \eta_T \\ &- \frac{1}{\rho_{ок1} \eta_{H1}^{ок}} \frac{K_m'}{K_m' + 1} \frac{1 + g_{6T}^{ок}}{1 + \Psi_{6H}^{ок}} \left( \Delta p_{\phi}^{ок'} + \Delta p_{маг}^{ок'} - p_{вх}^{ок} - \Delta p_{6H}^{ок} \right) \\ &- \frac{\chi_{H2} \delta_{H2}}{\rho_{ок2} \eta_{H2}^{ок}} K_m'' \left( \pi_T \Delta p_{\phi}^{ок'} + \Delta p_{\phi}^{ок''} + \Delta p_{маг}^{ок''} - \Delta p_{\phi}^{ок'} - \Delta p_{маг}^{ок'} \right) \\ &- \frac{1 - \chi_{H2}}{\rho_{убг} \eta_H^{убг}} \frac{1 + g_{6T}^{ок}}{1 + \Psi_{6H}^{ок}} \frac{1}{K_m' + 1} (\Delta p_{\phi}^{убг} + \Delta p_{маг}^{убг} - p_{вх}^{убг} - \Delta p_{6H}^{убг}) \end{aligned}$$

$$B = \frac{1}{\rho_{ок1} \eta_{н1}^{ок}} \frac{K'_m}{K'_m + 1} \frac{1 + g_{бт}^{ок}}{1 + \Psi_{бн}^{ок}} + \frac{\chi_{H2} \delta_{H2}}{\rho_{ок2} \eta_{н2}^{ок}} K''_m (\pi_T + C_{рег}^{ок} - 1) + \frac{1 - \chi_{H2}}{\rho_{увг} \eta_{н}^{увг}} \frac{1 + g_{бт}^{ок}}{1 + \Psi_{бн}^{ок}} \frac{1}{K'_m + 1} (1 + C_{дрос}^{увг})$$

На выходе снова получаем систему двух линейных независимых уравнений относительно трех переменных:  $p_k$ ,  $\varphi$ ,  $\pi_T$ . Если  $\pi_T$  определяем, то система замыкается. Для разных значений этой неизвестной получаем зависимости:

$$p_k = f(\pi_m)$$

$$\varphi = f(\pi_m)$$

Решая их, находим оптимальные параметры для двигателя.

Для расчета принимаем следующие значения (табл. 4.3):

Таблица 4.3

Параметр	Значение
Перепад на форсунках	0,5 МПа
Перепад на регуляторе, стабилизаторе, дросселе	0,2Рк МПа
Перепад на магистрали УВГ	0,7 МПа
Перепад на магистрали О <sub>2</sub> в ГГ	0,6 МПа
Перепад на магистрали О <sub>2</sub> в КС и магистрали Н <sub>2</sub>	0,8 МПа
Перепад в тракте охлаждения	0,3Рк МПа
Давление в баках	0,3 МПа
Степень использования водорода	0,98
КПД насосов окислителя, УВГ и водорода	0,7
КПД турбины	0,7
КПД бустерных насосов	0,8

КПД бустерных турбин	0,7
Плотность $C_4H_{10}$	580 кг/м <sup>3</sup>
Плотность $O_2$ на 1 насосе	1140 кг/м <sup>3</sup>
Плотность $O_2$ на 2 насосе	1140 кг/м <sup>3</sup>
Плотность $H_2$	70,76 кг/м <sup>3</sup>

Проведя расчет, получаем зависимость  $P_k$  от  $\varphi$  для разных значений  $\pi_T$  (табл. 4.4)

Таблица 4.4

$\pi_T$	$\varphi$	$P_{k1}, \text{Па}$	$P_{k2}, \text{Па}$
1,1	0,1	632726	21040048
	0,3	2969606	16313691
	0,6	6474926	9224156
	0,9	9980246	2134621
1,3	0,1	2223282	55972097
	0,3	7732346	43481909
	0,6	15995943	24746625
	0,9	24259539	6011342
1,5	0,1	3187610	83448351
	0,3	10618385	64851217
	0,6	21764548	36955516
	0,9	32910711	9059816

На рис. 4.1-3 графически представлено данное решение.

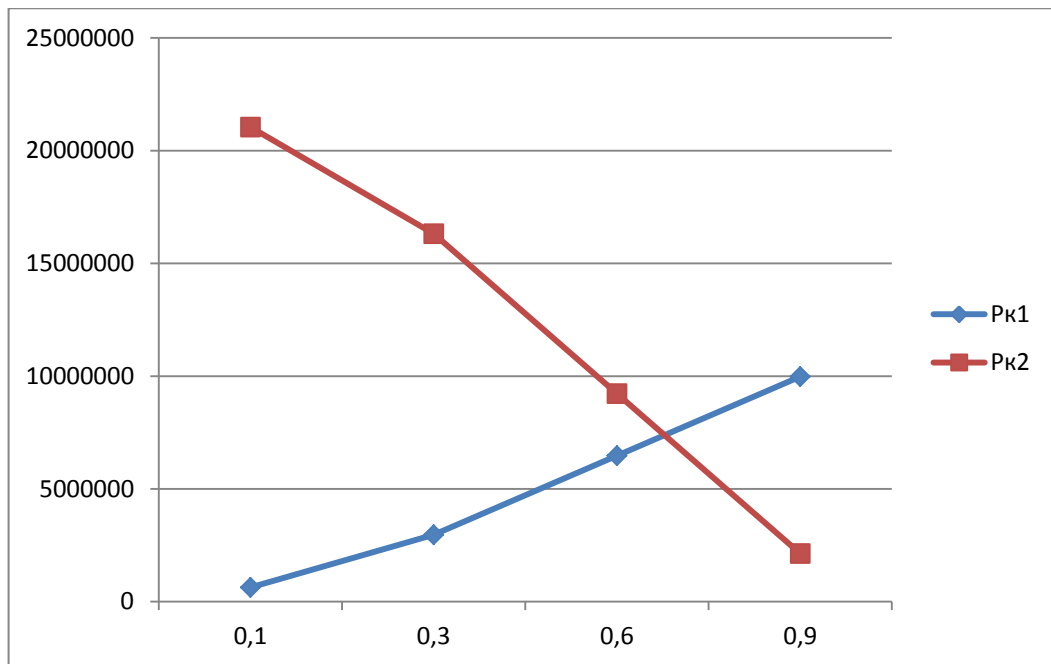


Рисунок 4.1 – графическое решение для  $R_k$  при  $\pi_m = 1,1$

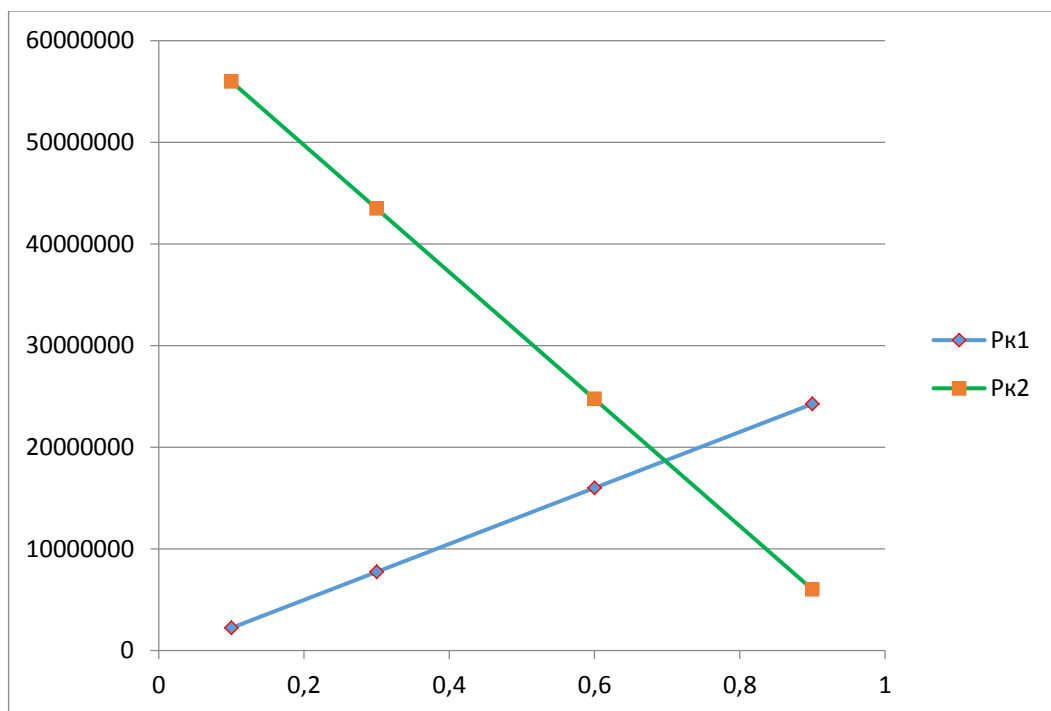


Рисунок 4.2 – графическое решение для  $R_k$  при  $\pi_m = 1,3$



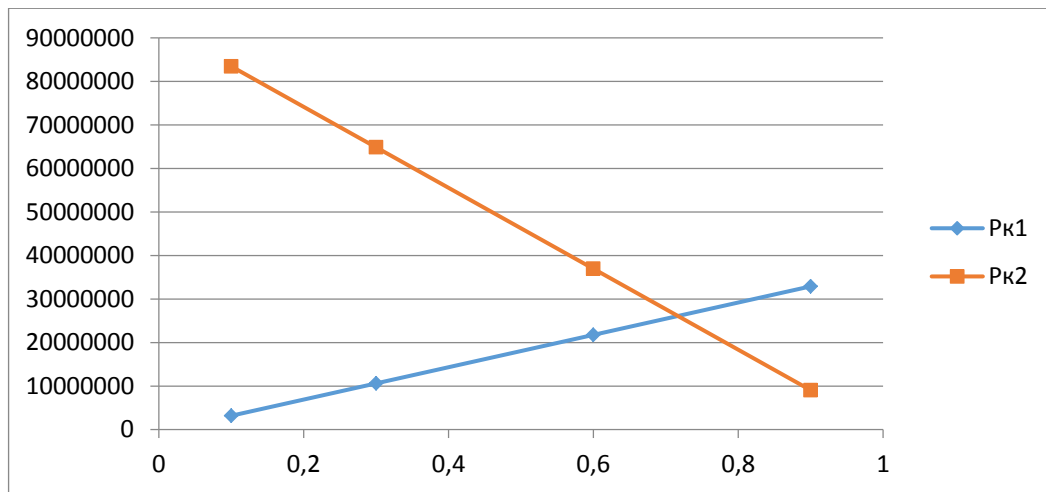


Рисунок 4.3 – графическое решение для  $P_k$  при  $\pi_m = 1,5$

Определяем точку пересечения и получаем оптимальные параметры для двигателя. Параметры приведены в табл. 4.5

Таблица 4.5

$\pi_t$	$\varphi$	$P_k$	$I_{уд}$	$I_{уд.дв}$
1,1	0,678	7384181	3341	3274
1,2	0,687	13634401	3464	3395
1,3	0,697	18674280	3523	3453
1,4	0,707	22764909	3559	3487
1,5	0,717	26101457	3583	3511

Выбираем параметры при  $\pi_t = 1,3$ :  $\varphi = 0,697$ ,  $p_k = 18,674$  МПа,  $I_{уд}^{дв} = 3453$  м/с.

#### 4.4 Массовые расходы.

Суммарный массовый расход через двигатель:

$$\dot{m}_{дв} = \frac{P}{I_{уд}} = 173,782 \text{ кг/с};$$

Суммарный массовый расход через ГГ:

$$\dot{m}_{\Sigma}'' = \dot{m}_{дв} \chi_{H_2} \delta_{H_2} (1 + K_m'') = 26,994 \text{ кг/с};$$

Расход окислителя в камеру сгорания:

$$\dot{m}'_{\text{ок}} = \dot{m}_{\text{дв}} \cdot \frac{K'_m}{K'_m + 1} (1 + g_{\text{от}}^{\text{от}}) = 130,336 \text{ кг/с};$$

Расход УВГ в камеру сгорания:

$$\dot{m}'_{\text{УВГ}} = \frac{\dot{m}'_{\text{ок}} \cdot (1 - \gamma)}{K'_m} = 30,368 \text{ кг/с};$$

Расход водорода в ГГ:

$$\dot{m}''_{\text{H}_2} = \frac{1}{1 + \Psi_{\text{бн}}^{\text{H}_2}} \dot{m}_{\text{дв}} \delta_{\text{H}_2} = 12,816 \text{ кг/с};$$

Расход окислителя в ГГ:

$$\dot{m}''_{\text{ок}} = \dot{m}_{\text{дв}} \chi_{\text{H}_2} \delta_{\text{H}_2} K''_m = 14,178 \text{ кг/с};$$

Расход водорода в камеру сгорания:

$$\dot{m}'_{\text{H}_2} = \dot{m}''_{\text{H}_2} = 12,816 \text{ кг/с};$$

#### 4.5 Проверка баланса мощностей

Мощности насосов и турбин:

Мощность насоса УВГ:

$$N_{\text{н}}^{\text{УВГ}} = \frac{1 - \chi_{\text{H}_2}}{\rho_{\text{УВГ}} \eta_{\text{н}}^{\text{УВГ}}} \dot{m} \sum \frac{1 + g_{\text{от}}^{\text{УВГ}}}{1 + \Psi_{\text{бн}}^{\text{УВГ}}} \left( \frac{1}{K_m + 1} \right) \Delta P_{\text{н}}^{\text{УВГ}} = 51343,77 \text{ Вт};$$

Мощность первого насоса окислителя:

$$N_{\text{н1}}^{\text{ок}} = \frac{1}{\rho_{\text{ок1}} \eta_{\text{н1}}^{\text{ок}}} \dot{m} \sum \frac{1 + g_{\text{от}}^{\text{ок}}}{1 + \Psi_{\text{бн}}^{\text{ок}}} \left( \frac{K'_m}{K'_m + 1} \right) \Delta P_{\text{н1}}^{\text{ок}} = 3320380 \text{ Вт};$$

Мощность второго насоса окислителя:

$$N_{\text{н2}}^{\text{ок}} = \frac{\chi_{\text{H}_2} \delta_{\text{H}_2}}{\rho_{\text{ок2}} \eta_{\text{н2}}^{\text{ок}}} \dot{m} \sum K''_m \Delta P_{\text{н2}}^{\text{ок}} = 184014 \text{ Вт};$$

Мощность на валу первой турбины:

$$N_{\text{т1}} = L_{\text{ад}} \eta_{\text{т}} \dot{m}''_{\Sigma} (1 - \varphi) = 3511192 \text{ Вт};$$

Проверка баланса мощностей

$$\delta_1 = \frac{|N_{\text{т1}} - (N_{\text{н}}^{\text{УВГ}} + N_{\text{н1}}^{\text{ок}} + N_{\text{н2}}^{\text{ок}})|}{N_{\text{т1}}} = 0,013$$

Мощность насоса водорода:

$$N_{\text{н}}^{\text{H}_2} = \frac{1}{\rho_{\text{H}_2} \eta_{\text{н}}^{\text{H}_2}} \delta_{\text{H}_2} \dot{m} \sum \Delta P_{\text{н}}^{\text{H}_2} \frac{1}{1 + \Psi_{\text{бн}}^{\text{H}_2}} = 8253411 \text{ Вт};$$

Мощность второй турбины:

$$N_{\tau 2} = L_{\text{ад}} \eta_{\tau} \dot{m}'_{\Sigma} (1 - \alpha) \varphi \delta_{\text{H}_2} (1 + K''_{\text{м}}) = 7950689 \text{ Вт} ;$$

$$\delta_2 = \frac{|N_{\tau 2} - N_{\tau 2}|}{N_{\tau 2}} = 0,038$$

## 5. СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАССМАТРИВАЕМЫХ ВАРИАНТОВ ДВИГАТЕЛЯ

Сопоставительный анализ приведен в табл. 5.1

Таблица 5.1

Параметр	Открытая схема	Закрытая схема
Давление в камере, МПа	17	18,674
Удельный импульс двигателя, м/с	3368,6	3453
Соотношение компонентов в камере	0,86	0,86
Соотношение компонентов в ГГ	0,14	0,14
Массовое соотношение компонентов в камере	3	3
Массовое соотношение компонентов в ГГ	1,1	1,1
Суммарный массовый расход двигателя, кг/с	178,114	173,782
Суммарный массовый расход в камеру, кг/с	174,434	173,782
Суммарный массовый расход в газогенератор, кг/с	3,681	26,994
Массовый расход через насос окислителя, кг/с	132,761	130,336
Массовый расход через насос УВГ, кг/с	30,526	30,368
Массовый расход через насос водорода, кг/с	14,826	12,816
Массовый расход окислителя в камеру, кг/с	130,825	130,336
Массовый расход УВГ в камеру, кг/с	30,526	30,368
Массовый расход водорода в камеру, кг/с	13,083	12,816
Массовый расход окислителя в газогенератор, кг/с	1,936	14,178
Массовый расход водорода в газогенератор, кг/с	1,744	12,816
Суммарная мощность насосов окислителя, МВт	4,524	3,504
Мощность насоса УВГ, МВт	3,289	5,134
Мощность турбины №1, МВт	7,813	3,511
Мощность насоса водорода, МВт	7,843	8,253
Мощность турбины №2, МВт	7,849	7,950

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При расчете двух схем трехкомпонентного двигателя с насосной системой подачи, были сделаны следующие выводы:

1. Двигатель выполненный по закрытой схеме обеспечивает полное использование энергии топлива, имеющегося на борту ракеты, так как отсутствуют потери тяги за счет расхода компонентов на привод ТНА, но обеспечение высокого давления в камере сгорания ведет к росту массогабаритных характеристик двигателя.

2. Двигатель открытой схемы проигрывает в удельных характеристиках, но его конструкция проще, массогабаритные характеристики меньше и как следствие двигатель дешевле.

3. Проанализировав характеристики двигателей, приходим к выводу, что выбор типа двигателя зависит от конкретного изделия, и нельзя отдать предпочтение конкретной без проведения анализа целей и задач летательного аппарата, на котором будет установлен двигатель.

## **7. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Гахун Г.Г. «Конструкция и проектирование ЖРД», 1989г.
2. Березанская Е.Л «Газогенераторы жидкостных ракетных двигателей», 1982г.
3. Штехер М.С. «Топлива и рабочие тела ракетных двигателей», 1976г.
4. Пинчук В.А. «Основы проектирования двигателей летательных аппаратов» Учебное пособие, ч.1; 1990г.
5. Пинчук В.А. «Энергетические аспекты РД». Конспект лекций