	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 _____

подпись

ФИО

дата

Руководитель _____

подпись

ФИО

дата

РЕФЕРАТ

Курсовой проект «Расчет и проектирование камеры ракетного двигателя» посвящен балансовому расчету и расчету камеры, а также ее конструированию. Также в данной работе рассмотрены характеристики топливных компонентов, изложены основные вопросы по конструкции камеры, описано функционирование разработанной схемы и конструкции, проведен термодинамический расчет схемы с дожиганием генераторного газа.

Работа состоит из десяти глав, введения, заключения и содержания общим объемом 66 страниц. В работе представлено 16 таблиц, 12 иллюстрации.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	7
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. ХАРАКТЕРИСТИКА ТОПЛИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ	9
1.1. Жидкий кислород.....	9
1.2. Керосин РГ-1 (Нафтил)	11
1.3. Характеристика топливной пары	12
1.4. ПГ-2	12
2. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ.....	14
3. ОПИСАНИЕ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПГС	16
4. РАСЧЕТ ПГС.....	17
4.1. Термодинамический расчет	17
4.2. Балансовый расчет	23
5. РАСЧЕТ КАМЕРЫ	25
5.1. Определение объема и размеров КС.....	26
5.3. Расчет ФГ	30
5.3.1. Расчет двухкомпонентной струйной газожидкостной форсунки	33
5.3.2. Расчет однокомпонентной форсунки горючего	34
5.4. Расчет массового соотношения компонентов в ядре потока и в пристеночном слое.....	36
5.5. Расчет регенеративного охлаждения	37
6. РАБОТА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ	45
7. НОМЕНКЛАТУРА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	46

8. РАСЧЕТ ДРОССЕЛЬНОЙ И ВЫСОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИК.....	47
8.1. Расчет дроссельной характеристики.....	47
8.2. Расчет высотной характеристики.....	49
9. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАМЕРЫ ДВИГАТЕЛЯ.....	51
10. РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ КАМЕРЫ РД.....	53
10.1 Общая несущая способность оболочек камеры.....	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	56
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	57
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	58
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	60
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	62
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	63

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

РД – ракетный двигатель;
РДУ – жидкостная ракетная двигательная установка;
ТНА - турбонасосный агрегат;
БНА – бустерный насосный агрегат;
ПГС – пневмогидравлическая схема;
ШЦБН – шнекоцентробежный насос;
СОБ – синхронное опорожнение баков;
РКС – регулировка кажущейся скорости;
ГГ – газогенератор;
КС – камера сгорания;
ФГ – форсуночная головка;
ДЗЧ – дозвуковая часть;
СЗЧ – сверхзвуковая часть;
ДУ – двигательная установка;
КПД – коэффициент полезного действия;
ПДК – предельно допустимая концентрация.

ВВЕДЕНИЕ

Основным элементом ракетного двигателя является камера сгорания. Ее параметры обуславливают энергетические характеристики ЖРД в целом.

Целью данной работы является расчет и проектирование камеры РД двигательной установки. Прототипом для расчета был выбран двигатель РД120 со следующими характеристиками:

1. Тяга в пустоте: $P_{\pi}=850$ кН;
2. Давление на срезе сопла: $p_a=0,015$ МПа;
3. Компоненты топлива: $(O_2)_ж + РГ-1$;
4. Суммарное время работы: $\tau_{\Sigma}=350$ с.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ТОПЛИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ

1.1. Жидкий кислород

Кислород в жидком состоянии является бледно-синей жидкостью, пары кислорода бесцветны. Кислород не имеет цвета, запаха, вкуса, считается не токсичным.

При контакте с маслами нефтяного происхождения кислород способен к взрыву, поэтому охлаждение и смазка подшипников осуществляется самим компонентом. Это также обусловлено его значительными теплофизическими характеристиками (табл.1) и высокой текучестью. Вследствие криогенности контакт жидкого кислорода с металлом приводит к охрупчиванию последнего. Низкая вязкость и лёгкая испаряемость жидкого кислорода обуславливает хорошее смесеобразование в двигателе.

Жидкий кислород не является коррозионно активным, что позволяет не ограничивать выбор материалов. Малая стоимость вследствие наличия производственной и сырьевой базы также являются важными достоинствами жидкого кислорода.

Таблица 1 – Физические свойства жидкого кислорода

Плотность, кг/м ³	1144
Температура плавления, К	54
Температура кристаллизации, К	64
Температура кипения, К	90
Теплота испарения, кДж/кг	214
Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	1700
Кинематическая вязкость, м ² /с	0,17·10 ⁻⁶
ПДК	не токсичен
Химическая стабильность	стабилен
Энтальпия, кДж/кг	-398,3

Жидкий кислород, используемый в ракетных двигателях, является окислителем с высоким энергетическим уровнем. Степень криогенности жидкого кислорода значительная.

Однако применение жидкого кислорода имеет ряд недостатков:

1. активности жидкого кислорода недостаточно для образования самовоспламеняющейся топливной пары;

2. низкая температура кипения $T_{\text{кип}}=90\text{K}$ и, как следствие, необходимость термостатирования баков и захолаживания системы перед запуском.

Все емкости и трубопроводы для жидкого кислорода перед заполнением должны тщательно обезжириваться и обезвоживаться. В качестве прокладочного материала при работе с жидким кислородом применяют фторопласты, винилпласты, специальные сорта резины из изопренового каучука.

Жидкий кислород обладает очень высоким давлением насыщенных паров. С увеличением температуры давление пара значительно возрастает, и поэтому кислородные баки должны дренироваться в атмосферу. В целях безопасности необходимо оборудовать бак жидкого кислорода предохранительным клапаном.

Баки и трубопроводы перед заполнением жидким кислородом должны продуваться горячим воздухом или как в проектируемом ЖРД гелием для полного удаления влаги, иначе возможны примерзания клапанов и другой арматуры.

Кислород обеспечивает высокий удельный импульс и является относительно дешевым окислителем. Технология получения жидкого кислорода довольно проста и хорошо освоена.

Все вышеперечисленные факторы обуславливают широкое применение жидкого кислорода в качестве окислителя для РД.

1.2. Керосин РГ-1 (Нафтил)

Нафтил – смесь индивидуальных углеводородов, жидкость жёлтого или жёлто-зелёного цвета с характерным запахом. Слабо токсичен, ПДК = 0,3 мг/л. Стабилен. Хорошо растворяет газы и гигроскопичен. Коррозионно практически неактивен. Допускается применять стали различных марок, цветные металлы, пластмассы и резины. Пожароопасен, а в кислородных средах – взрывоопасен.

Нафтил был получен из керосина Т-1 гидрогенизацией последнего с последующей очисткой. Это позволило получить горючее с более высокими охлаждающими свойствами вследствие высокой температуры коксообразования (около 1100К), а также несколько повысить энергетические характеристики. Нафтил применяется в ракетной технике как горючее с окислителями: жидким кислородом, азотной кислотой, азотным тетраксидом и концентрированной перекисью водорода. РГ-1 имеет хорошо развитую производственную базу. Одним из его недостатков является цена. Он дороже Т-1 примерно в 2 раза. Хранение и транспортировка осуществляется в обычных емкостях. Наддув баков необходимо осуществлять инертным газом. Температурный диапазон жидкофазного состояния обеспечивает нафтилу большие удобства в эксплуатации.

Таким образом, нафтил предпочтителен для ЖРД, так как он имеет высокую температуру кипения, неплохие физические характеристики (табл. 2), что позволяет использовать его для охлаждения камеры сгорания.

Таблица 2 – Физические свойства нафтила

Плотность, кг/м ³	832,7
Температура плавления, К	200-220
Температура кипения, К	468-543
Теплота испарения, кДж/кг	343
Температура вспышки, К	330

Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	2376
Кинематическая вязкость, м ² /с	$2,9 \cdot 10^{-6}$
ПДК, мг/л	0,3
Химическая стабильность	Стабилен
Энтальпия, кДж/кг	-1295

1.3. Характеристика топливной пары

Данная топливная пара хорошо отработана, применялась во многих двигателях. Удельный импульс такого топлива может достигать величин 3500 м/с. Технологии получения нафтила и жидкого кислорода хорошо освоены, дефицита в сырье нет. Основными продуктами сгорания является углекислый газ и пары воды. Нетоксичность продуктов сгорания позволяет расширить применение топливной пары. Компоненты коррозионно не активны, а значит, не требуют особых материалов конструкции. Нетоксичность топлива позволяет снизить эксплуатационные требования. Стабильность компонентов топлива приводит к возможности длительного хранения РДУ в заправленном состоянии.

Основным недостатком является то, что данное топливо не самовоспламеняющееся. Это вынуждает применять различные виды зажигания. Склонность керосина к коксообразованию вызывает необходимость усложнения конструкции камеры для ее эффективного охлаждения, а криогенность жидкого кислорода – термостатирования баков. Несмотря на это топливная пара жидкий кислород – керосин широко применяется.

1.4. ПГ-2

ПГ-2 - синтетическое металлоорганическое горючее. Представляет собой смесь 15% триэтилалюминия и 85% триэтилбора. Прозрачная, бесцветная жидкость с характерным "этиловым" запахом.

Самовоспламеняется с любыми окислителями. Является высококипящим пусковым горючим. Чрезвычайно токсично (ПДК = 0,0007 мг/л). Экологически опасно. Химически стабильно. Коррозионно неагрессивно. Допускает использование хромоникелевых сталей, алюминиевых сплавов и фторопластов. Чрезвычайно пожароопасно. Самовоспламеняется на воздухе, бурно реагирует с водой, спиртом, аминами.

Производится путем смешения исходных компонентов, получаемых при взаимодействии соответствующих металлов с этиленом. Имеет достаточно развитую производственную базу. Очень дорого, в 1,5-2 тысячи раз дороже жидкого кислорода. Хранится и транспортируется в ампулированном виде.

2. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ

В данной работе по заданию вследствие работы двигателя в условиях высокой разреженности (вторая ступень) и имея большое давление в КС у аналога, выбираем насосную систему питания закрытого типа. Это объясняется назначением двигателя и большим временем суммарной работы. При выборе открытой схемы в данном двигателе возрастут потери и, как следствие, увеличится масса компонентов и бака, что негативно скажется на массе выводимого груза. Также применение закрытой схемы приводит к некоторому приросту энергетических характеристик.

В системах РД с насосной подачей компоненты топлива подаются из баков в камеру центробежными насосами, приводимыми во вращение турбиной, которые вместе составляют турбонасосный агрегат. Привод турбины осуществляется рабочим телом – генераторным газом. В большинстве случаев генераторный газ вырабатывается в специальной камере – ГГ, входящем в состав двигателя.

Одной из особенностей схем питания с турбонасосной подачей является то, что баки компонентов во время работы находятся под небольшим давлением наддува, величина которого обусловлена обеспечением бескавитационной работы насосов. Это приводит к уменьшению массовых характеристик баков.

Конструктивно РД с закрытой схемой сложнее и требуют более совершенного оборудования, чем РД с открытой схемой, но переход к их использованию позволяет повысить удельный импульс двигателя и снизить габаритные характеристики РД за счет повышения давления в КС.

Особенностью РД закрытой схемы является дожигание генераторного газа, совершившего работу на турбине, в КС. Обычно через газогенератор пропускают весь расход одного из компонентов. Температура генераторного газа ограничена материалом лопаток, поэтому горение в ГГ происходит при

коэффициенте избытка окислителя, далеко от стехиометрического. При этом массовый расход одного из компонентов значительно превышает расход другого, а так как адиабатная работа, прямо пропорциональная мощности турбины, зависит от расхода через последнюю, то целесообразно в качестве основного компонента для образования генераторного газа использовать тот, массовый расход которого больше. Кроме того, это дает возможность регулировки двигателя по меньшему расходу. Таким образом, в проектируемом двигателе правильнее использовать окислительный ГГ.

За счет применения закрытой системы питания появляется возможность полного использования химической энергии топлива для преобразования в кинетическую энергию. Зависимость удельного импульса двигателя от давления в КС совпадает с той же зависимостью для камеры двигателя, а значит, повышение давления в КС всегда будет вести к увеличению удельного импульса двигателя. Но в данном случае максимально достижимые значения давления в КС ограничиваются в первую очередь обеспечиваемой мощностью ТНА, которая определяется расходом генераторного газа через турбину и его термодинамическими параметрами. Кроме того, возможность получения больших давлений ограничена возможностями насосов, которые оказываются не в состоянии обеспечить необходимый напор.

Эти ограничения приводят к использованию РД с дожиганием генераторного газа с давлениями в КС до 30 МПа в случае газификации одного компонента и до 50 МПа в случае газификации обоих компонентов.

К недостаткам РД закрытой схемы можно отнести трудность и малый диапазон регулирования по тяге, которая в данном случае осуществляется изменением температуры генераторного газа, и сложность в изготовлении.

3. ОПИСАНИЕ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПГС

ПГС проектируемого двигателя оформляется на чертеже: КП АААА.ВВВВ.ССС, где АААА – номер группы, ВВВВ – год окончания учебы, СССР – номер чертежа. На ПГС должны быть представлены следующие агрегаты и системы: КС, ГГ, агрегаты системы подачи топлива, баки с дренажно-предохранительными, заправочно-сливными клапанами, система наддува баков, система запуска, система захлаживания магистралей, система продувки, агрегаты автоматики.

Рассказать о назначении агрегатов и систем, входящих в ПГС и их особенностях применительно к проектируемому двигателю. Для систем так же перечислить ее элементы.

Работа системы

Описать исходного положение компонентов ПГС.

Запуск

Рассказать о работе всех систем и агрегатов ПГС двигателя на этапе запуска.

Регулирование двигателя в процессе работы

Рассказать о способе регулирования двигателя в процессе работы и о работе компонентов ПГС.

Остановка двигателя

Рассказать о работе всех систем и агрегатов двигателя при остановке двигателя.

4. РАСЧЕТ ПГС

4.1. Термодинамический расчет

Выбор параметров в газогенераторе.

В ДУ закрытого типа используем окислительный газогенератор. Весь расход окислителя проходит через газогенератор и турбину. Параметры рабочего тела имеют ограничения, из-за коррозионной стойкости лопаток турбины температура окислительного газа не должна превышать 850 К.

Из результата терморасчета получаем $\alpha=13,7$. Параметры приведены в табл. 3.

Таблица 3 – параметры рабочего тела в ГГ.

Km''	$R, \text{Дж/кг}\cdot\text{К}$	$T, \text{К}$	n
46,51	260	802	1,31

Выбор параметров в КС.

Зависимость удельного импульса камеры от коэффициента избытка окислителя (табл. 4; рис. 1)

Таблица 4. Зависимость удельного импульса камеры от коэффициента избытка окислителя.

α	$I_{\text{уд}}$		
	$P_K=5$	$P_K=10$	$P_K=15$
0,80	3527,05	3624,04	3673,51
0,84	3536,11	3640,37	3693,98
0,85	3536,72	3643,17	3698,02
0,86	3536,57	3645,38	3701,02
0,87	3535,81	3646,97	3703,70
0,88	3534,18	3648,30	3705,81

α	I уд		
	P _к =5	P _к =10	P _к =15
0,90	3528,90	3648,19	3708,58
0,91	3525,30	3647,01	3708,88
0,92	3521,15	3645,02	3708,30
0,93	3516,65	3642,33	3707,13
0,95	3506,60	3634,50	3702,14

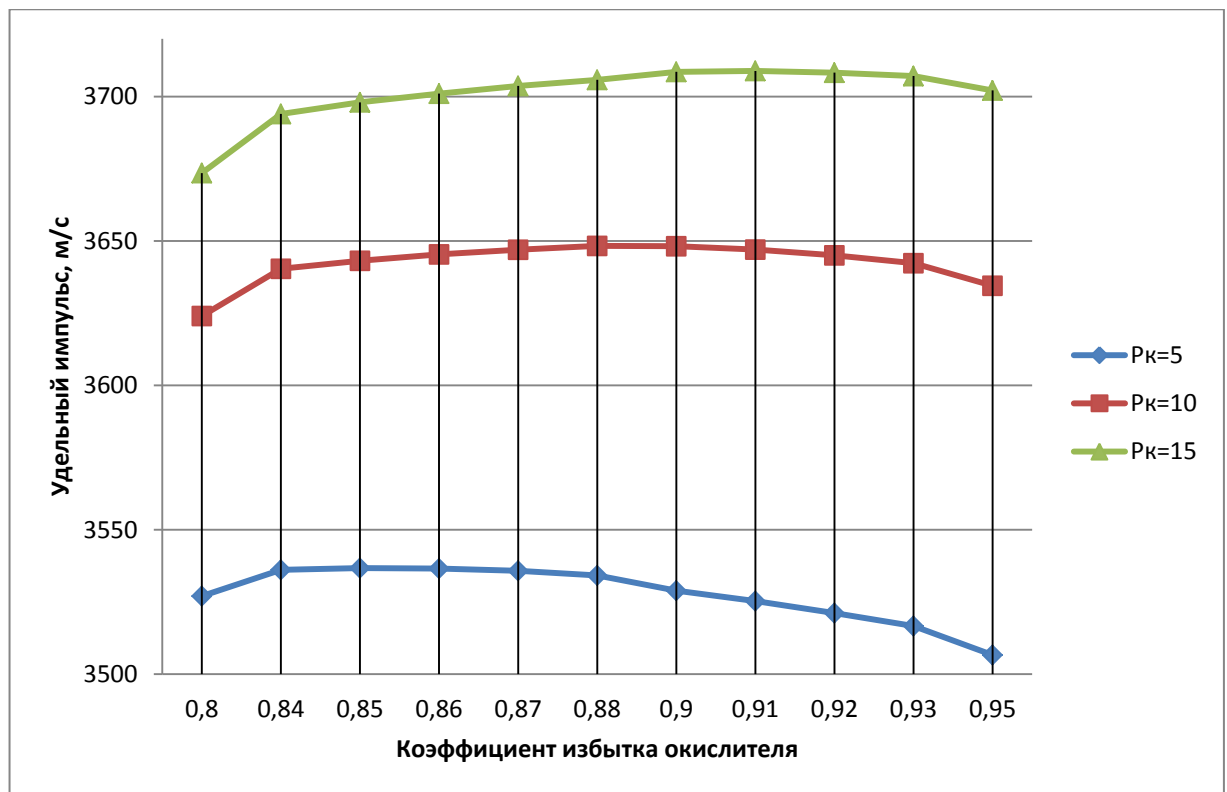


Рисунок 1 – зависимость удельного импульса камеры от коэффициента избытка окислителя для разных давлений

Как видим по таблице 4 и рисунку 1 оптимальное значение α , соответствующее максимальному значению удельного импульса, смещается ближе к 1 при росте давления в камере.

Принимаем в камере сгорания $\alpha=0,94$, $K_m'=3,19$.

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

Система уравнений:

$$N_{\text{от}}^{\text{ок}} = N_{\text{от}}^{\text{ок}} \quad (1)$$

$$N_{\text{от}}^{\text{г}} = N_{\text{от}}^{\text{г}} \quad (2)$$

$$N_{\text{т}} = N_{\text{н}}^{\text{г1}} + N_{\text{н}}^{\text{г2}} + N_{\text{н}}^{\text{ок}} \quad (3)$$

Уравнение для мощности на турбине:

$$N_{\text{т}} = \dot{m}_{\Sigma}'' * L_{\text{ад}} * \eta_{\text{т}} = \chi_{\text{о}} \frac{K_{\text{м}}}{K_{\text{м}} + 1} \left(1 + \frac{1}{K_{\text{м}}} \right) \dot{m}_{\Sigma} L_{\text{ад}} \eta_{\text{т}} \quad (4)$$

где $\chi_{\text{о}}$ - степень использования окислителя для получения на его основе генераторного газа ($\chi_{\text{о}} = \dot{m}_{\text{о}}'' / \dot{m}_{\text{о}}$).

Мощность насоса окислителя:

$$N_{\text{но}} = \frac{1}{\rho_{\text{о}} \eta_{\text{но}}} \dot{m}_{\Sigma} \cdot \left(\frac{K_{\text{м}}}{K_{\text{м}} + 1} \right) (1 + g_{\text{ок}}^{\text{от}}) \Delta P_{\text{но}} \quad (5)$$

где $\Delta P_{\text{но}}$ – перепад давления на насосе окислителя

$$\Delta P_{\text{но}} = P_{\text{вых}}^{\text{но}} - P_{\text{вх}}^{\text{но}} = (\pi_{\text{т}} (P_{\text{к}} + \Delta P_{\text{фо}}) + \Delta P_{\text{фо}}'' + \Delta P_{\text{маг.о}}'' - P_{\text{вх}}^{\text{но}}) \frac{1}{1 + \Psi_{\text{от}}^{\text{ок}}} \quad (6)$$

Мощность насоса горючего:

$$N_{\text{нг1}} = \frac{1}{\rho_{\text{г}} \eta_{\text{нг}}} \dot{m}_{\Sigma} \cdot \left(\frac{1}{K_{\text{м}} + 1} \right) (1 + g_{\text{г}}^{\text{от}}) \Delta P_{\text{нг1}} \quad (7)$$

где $\Delta P_{\text{нг1}}$ – перепад давления на насосе горючего

$$\Delta P_{\text{нг1}} = P_{\text{вых}}^{\text{нг}} - P_{\text{вх}}^{\text{нг}} = (P_{\text{к}} + \Delta P_{\text{фг}} + \Delta P_{\text{маг.г}} + \Delta P_{\text{тр.охл}} + \Delta P_{\text{соб}} - P_{\text{вх}}^{\text{нг}}) \frac{1}{1 + \Psi_{\text{от}}^{\text{г}}} \quad (8)$$

Мощность на дополнительном насосе горючего:

$$N_{\text{нг2}} = \frac{1}{\rho_{\text{г}} \eta_{\text{нг}}} \dot{m}_{\Sigma} \cdot \left(\frac{1}{K_{\text{м}} + 1} \right) \Delta P_{\text{нг2}} \quad (9)$$

$\Delta P_{\text{нг2}}$ – перепад давления на дополнительном насосе горючего

$$\begin{aligned}
\Delta P_{\text{нг2}} &= P_{\text{вых}}^{\text{нг2}} - P_{\text{вх}}^{\text{нг2}} \\
&= (\pi_T (P_K + \Delta P'_{\phi o}) + \Delta P''_{\phi \Gamma} + \Delta P''_{\text{маг.}\Gamma} + \Delta P_{\text{рег.}\Gamma} - P_K - \Delta P'_{\phi \Gamma} \\
&\quad - \Delta P'_{\text{маг.}\Gamma} - \Delta P_{\text{тр.охл}} - \Delta P_{\text{собр}})
\end{aligned} \tag{10}$$

Подставляя все в формулу (3) получаем зависимость давления в камере сгорания от перепада давления на турбине:

$$P_K = \frac{A}{B} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
A &= \chi \left(1 + \frac{1}{K''_m} \right) L_{\text{ад}} \eta_T \\
&\quad - \frac{1}{\rho_o \eta_{\text{но}}} (1 + g_{\text{ок}}^{\beta_T}) (\pi_T \Delta P'_{\phi o} + \Delta P''_{\phi o} + \Delta P''_{\text{маг.о}} - P_{\text{вх}}^{\text{но}}) \frac{1}{1 + \Psi_{\text{бн}}^{\text{ок}}} \\
&\quad - \frac{1}{\rho_{\Gamma} \eta_{\text{нг}}} \frac{1}{K'_m} (1 + g_{\Gamma}^{\beta_T}) (\Delta P'_{\phi \Gamma} + \Delta P'_{\text{маг.}\Gamma} - P_{\text{вх}}^{\beta_{\text{нг}}}) \frac{1}{1 + \Psi_{\text{бн}}^{\Gamma}} \\
&\quad - \frac{1}{\rho_{\Gamma} \eta_{\text{нг}}} \chi \left(1 + \frac{1}{K''_m} \right) \left(\frac{1}{K''_m + 1} \right) (\pi_T \Delta P'_{\phi o} + \Delta P''_{\phi \Gamma} - \Delta P'_{\phi \Gamma} \\
&\quad + \Delta P''_{\text{маг.}\Gamma} - \Delta P'_{\text{маг.}\Gamma})
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
B &= \frac{1}{\rho_o \eta_{\text{но}}} (1 + g_{\text{ок}}^{\beta_T}) \pi_T \frac{1}{1 + \Psi_{\text{бн}}^{\text{ок}}} \\
&\quad + \frac{1}{\rho_{\Gamma} \eta_{\text{нг}}} \frac{1}{K'_m} (1 + g_{\Gamma}^{\beta_T}) (1 + C_{\text{охл}} + C_{\text{дрос}}) \frac{1}{1 + \Psi_{\text{бн}}^{\Gamma}} \\
&\quad + \frac{1}{\rho_{\Gamma} \eta_{\text{нг}}} \chi \left(1 + \frac{1}{K''_m} \right) \left(\frac{1}{K''_m + 1} \right) (\pi_T - 1 + C_{\text{рег}} - C_{\text{охл}} \\
&\quad - C_{\text{дрос}})
\end{aligned} \tag{13}$$

Для расчета принимаем следующие параметры (табл. 5).

Таблица 5. Значения, принимаемые для расчета.

Параметр	Значение
Перепад на форсунках	0,5 МПа
Перепад на магистралях окислителя и доп насоса горючего	0,6 МПа
Перепад на магистрали насоса горючего	0,7 МПа
Давление в баках	0,3 МПа
Коэффициент перепада в тракте охлаждения	0,35
Коэффициент перепада на регуляторе, дросселе	0,2
Степень использования окислителя	0,98
КПД насоса окислителя	0,7
КПД насоса горючего	0,7
КПД турбины	0,7
КПД бустерных насосов	0,9
КПД бустерных турбин	0,9
Относительный напор бустерного насоса окислителя	0,05
Относительный напор бустерного насоса горючего	0,02

Проведя расчет, получаем зависимость P_k от π_t (табл. 6; рис. 2)

Таблица 6. Зависимость давления в камере сгорания от перепада давления на турбине

π_t	$P_k, \text{Па}$
1,3	12470289
1,4	15316522
1,5	17627740
1,6	19511240
1,7	21049472
1,8	22306611

Пт	Рк, Па
1,9	23333180
2	24169361
2,1	24847409
2,2	25393424
2,3	25828688
2,4	26170676
2,5	26433821

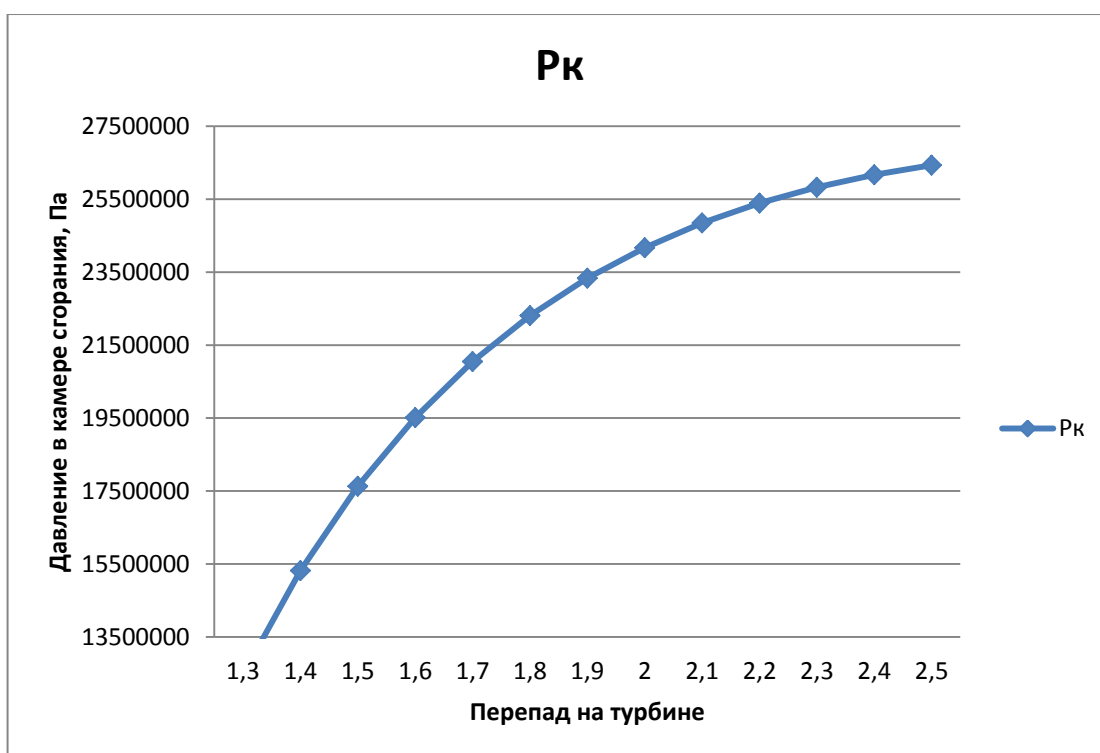


Рисунок 2 – Зависимость давления в камере сгорания от перепада на турбине

Из зависимости видно, что максимально значение P_k находится в области очень высоких давлений и в достижение его уровня теряется смысл ввиду вероятной громоздкости конструкции. Принимаем значение $\pi_t=1,7$ и соответствующее ему значение давления в камере сгорания $P_k=21049472$ Па (21,05 МПа).

4.2 Балансовый расчет

Суммарный массовый расход через двигатель:

$$\dot{m}_{\text{дв}} = \frac{P}{I_{\text{уд}}} = 235,894 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (14)$$

Расход окислителя через насос окислителя:

$$\dot{m}'_{\text{но}} = \dot{m}_{\text{дв}} * \frac{K'_m}{K'_m + 1} (1 + g_0^{\text{бт}}) = 183,845 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (15)$$

Расход горючего через насос горючего:

$$\dot{m}'_{\text{нг}} = \dot{m}_{\text{дв}} * \frac{1}{K'_m + 1} (1 + g_{\text{г}}^{\text{бт}}) = 68,025 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (16)$$

Расход горючего через дополнительный насос горючего:

$$\dot{m}''_{\text{нг}} = \dot{m}_{\text{дв}} \frac{1}{K''_m + 1} = 3.649 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (17)$$

Суммарный массовый расход через газогенератор:

$$\dot{m}'_{\Sigma} = \frac{K'_m}{K'_m + 1} * \chi_0 * \dot{m}_{\text{дв}} * \left(\frac{1}{K'_m + 1} \right) = 173,342 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (18)$$

Массовый расход окислителя через газогенератор:

$$\dot{m}''_0 = \dot{m}''_{\Sigma} - \dot{m}'_{\text{г}} = 169,047 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (19)$$

Массовый расход окислителя через камеру сгорания:

$$\dot{m}'_0 = \dot{m}''_0 = 169,047 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (20)$$

Массовый расход горючего через камеру сгорания:

$$\dot{m}'_{\text{г}} = \dot{m}'_{\Sigma} - \dot{m}'_0 = 62,697 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (21)$$

4.5 Проверка баланса мощностей.

Мощности насосов и турбин:

Мощность насоса горючего:

$$N_{\text{нг}} = \frac{1}{\rho_{\text{г}} \eta_{\text{нг}}} \dot{m}'_{\Sigma} \cdot \left(\frac{1}{K'_m + 1} \right) \Delta P_{\text{нг1}} = 12639664 \text{ Вт} \quad (22)$$

Мощность дополнительного насоса горючего:

$$N_{\text{нг2}} = \frac{1}{\rho_{\text{г}} \eta_{\text{нг}}} \dot{m}''_{\Sigma} \cdot \left(\frac{1}{K''_m + 1} \right) \Delta P_{\text{нг2}} = 52233 \text{ Вт} \quad (23)$$

Мощность насоса окислителя:

$$N_{\text{HO}} = \frac{1}{\rho_o \eta_{\text{HO}}} \dot{m}'_{\Sigma} \cdot \left(\frac{K_m}{K_m + 1} \right) \Delta P_{\text{HO}} = 8249656 \text{ Вт} \quad (24)$$

Мощность на валу турбины:

$$\begin{aligned} N_T &= \dot{m}''_{\Sigma} * L_{\text{ад}} * \eta_T = \chi_o \frac{K_m}{K_m + 1} \left(1 + \frac{1}{K_m} \right) \dot{m}'_{\Sigma} L_{\text{ад}} \eta_T \\ &= 12639664 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (25)$$

Проверка баланса мощностей

$$\delta = \frac{N_T - (N_{\text{HГ1}} + N_{\text{HГ2}} + N_{\text{HO}})}{N_T} = 0,031 \quad (26)$$

Погрешность ниже 5%, поэтому принимаем результаты расчета.

5. РАСЧЕТ КАМЕРЫ

Камера РД предназначена для преобразования химической энергии топлива в кинетическую энергию истекающей струи газов в результате чего создается реактивная тяга.

Камера представляет собой паяно-сварную конструкцию, состоящую из форсуночной головки, цилиндрической части и сопла. В таблице 5 указаны исходные данные для проектирования, полученные в результате балансового и термодинамического расчета с использованием программы Termoras.

Таблица 7 – Исходные данные.

Наименование	Обозначение	Значение
Пустотная тяга, кН	P_{Π}	850
Пустотный удельный импульс, м/с	$I_{уд}^{\Pi}$	3749
Давление в КС, МПа	$P_{кс}$	21
Давление на срезе сопла, МПа	P_a	0,015
Суммарный массовый расход в КС, кг/с	m'_{Σ}	235,894
Массовый расход окислителя в КС, кг/с	$m'_{ок}$	169,047
Массовый расход горючего через КС, кг/с	$m'_{г}$	62,697
Соотношение компонентов топлива в КС	K_m'	2,76

Наименование	Обозначение	Значение
Коэффициент избытка окислителя	α	0,812
Теоретический расходный комплекс, м/с	β_T	1798
Показатель процесса	n	1,18
Температура в КС, К	T'	3865
Газовая постоянная, Дж/кг*К	R'	338
Безразмерная площадь	f_a	99,8
Число Маха	M	5,175

5.1. Определение объема и размеров КС

Существует несколько разновидностей форм КС. Наибольшее распространение получила цилиндрическая КС за счет относительной технологической простоты в сочетании с оптимальными параметрами течения и хорошей организацией внутрикамерных процессов.

Под объемом КС понимается суммарный объем цилиндрической части и ДЗЧ сопла. Определение объема возможно несколькими способами:

- а) по величине приведенной длины;
- б) по времени пребывания;
- в) по величине объемной расходонапряженности;
- г) по величине литровой тяги;

В данной работе применен первый способ.

1) В соответствии с табл.3.1[2] примем величину приведенной длины $l_{пр} = 1,5$.

2) Площадь сечения в критике будет равна:

$$F_{min} = \frac{\varphi \beta_T \dot{m}}{P_K} = 0,02 \text{ м}^2 \quad (27)$$

$$R^* = \sqrt{\frac{F_{min}}{\pi}} = 0,08 \text{ м} \quad (28)$$

3) Тогда объем КС определится через формулу:

$$V_{КС} = l_{пр} * F_{min} = 0.03 \text{ м}^3$$

(29)

4) Диаметр КС определяем как 2 диаметра критики:

$$D_{КС} = 2 * 2 * R^* = 0,320 \text{ м} \quad (30)$$

$$F_{КС} = \pi \left(\frac{D_{КС}}{2} \right)^2 = 0,08 \text{ м}^2 \quad (31)$$

5) Тогда длина камеры сгорания будет:

$$L_{КС} = \frac{V_{КС}}{F_{КС}} = 0,375 \text{ м} \quad (32)$$

6) Время пребывания в камере будет равно:

$$\tau_{пр} = l_{пр} \frac{\varphi \beta \beta_T}{R_K T_K} = 0,0019 \text{ с} \quad (33)$$

5.2. Профилирование ДЗЧ и СЗЧ сопла

Определяемые размеры для ДЗЧ представлены на рис.1.

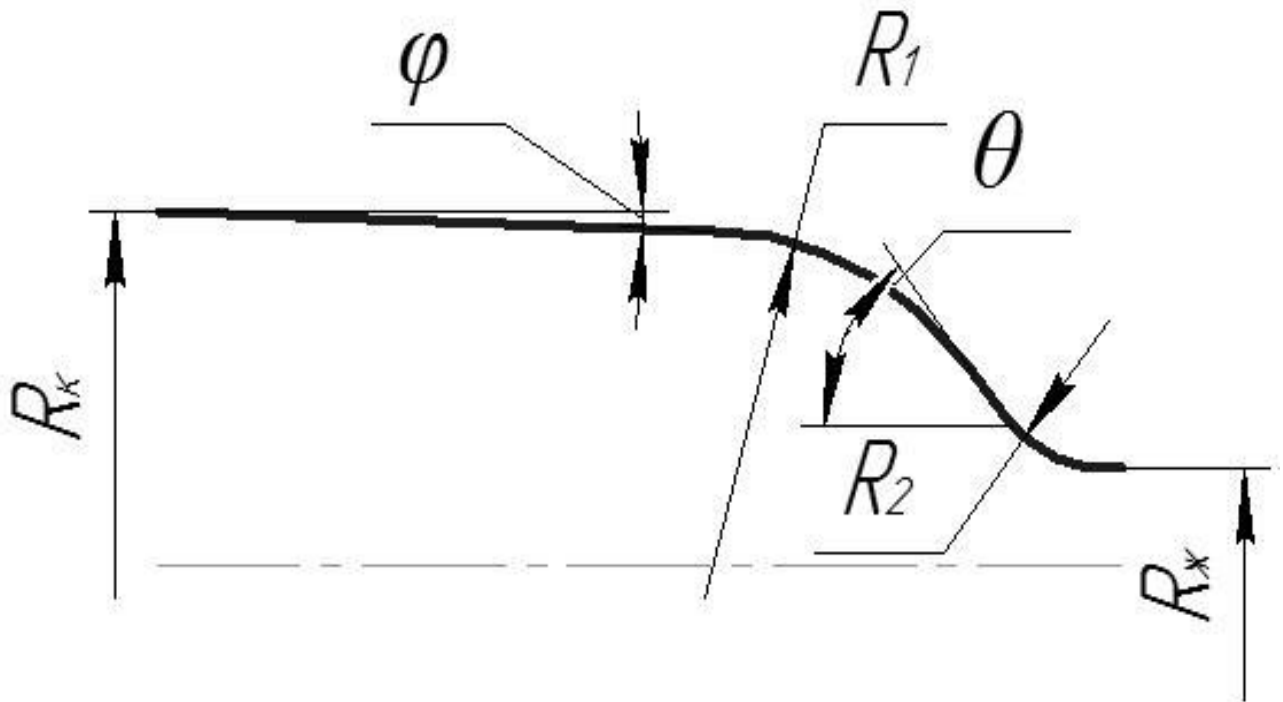


Рисунок 3 - Схема профилирования ДЗЧ сопла.

В соответствии с рекомендациями принимаем $R_1 = 1,8 * R_{kc} = 0,287$ м, $R_2 = R_* = 0,08$ м, углы $\varphi = 0^\circ$, $\theta \leq 40^\circ$.

Отношение площади камеры сгорания к площади критического сечения равно 4, следовательно, камера изобарическая. Длина ДЗЧ по рис.3.8 [2] $L_{ДЗЧ} = R_{kc} = 0,32$ м.

Профилирование СЗЧ сводится к определению углов профиля, диаметра среза сопла и длины СЗЧ.

- 1) В соответствии с известной безразмерной площадью находим площадь, а затем и диаметр среза сопла: $F_a = f_a * F_* = 1,99$ м², $D_a = 1,592$ м.
- 2) Для определения угла наклона контура на срезе найдем скорость на срезе, плотности смеси на срезе и в камере:

$$W_a = \sqrt{2 * L_{ад}} = \sqrt{2 * \frac{n}{n-1} R' T' \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_k} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)}; \quad (34)$$

$$\rho_k = \frac{P_k}{R'T'}; \quad (35)$$

$$\rho_a = \rho_k \left(\frac{P_a}{P_k} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (36)$$

где W_a - скорость ПС на срезе сопла;

$L_{ад}$ - адиабатная работа расширения ПС;

ρ_k - плотность ПС в КС;

ρ_a – плотность ПС на срезе сопла.

Получаем $W_a=3374$ м/с, $\rho_k=16,1$ кг/м³, $\rho_a=0,035$ кг/м³.

3) Угол наклона контура на срезе определится через формулу ($P_H=0$):

$$\theta_a = \frac{\arcsin\left(\frac{(P_a - P_H)}{0,5 * \rho_a * W_a^2} * \sqrt{M_a^2 - 1}\right)}{2}, \quad (37)$$

Имеем $\theta_a=11,15^\circ$

4) В соответствии с углом на срезе и рис.2.13 [1] задаем угол входной части СЗЧ: $\theta_m=34^\circ$.

5) По рис.2.13 [1] определяем через отношение длины СЗЧ сопла к радиусу критики и длину СЗЧ: $L_{сзч}=1,700$ м.

Построение контура СЗЧ осуществим по методу парабол [1].
Графическая схема метода представлена на рис. 4.

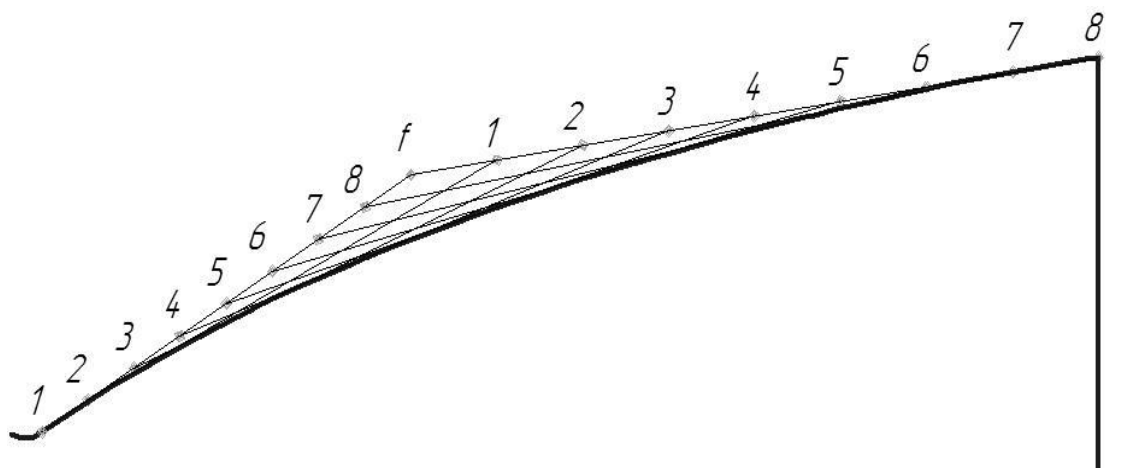


Рисунок 4 – Метод парабол.

5.3. Расчет ФГ

Форсуночная головка КС является одним из самых расходо- и теплонапряженных элементов камеры и требует тщательной проработки. От ее компоновки и применяемых форсунок напрямую зависит протекание внутрикамерных процессов. ФГ должна обеспечивать расчетное соотношение компонентов при наличии пристеночного слоя, устойчивость работы КС, надежное охлаждение камеры и огневого днища, оптимальную компоновку подводов компонентов к камере. В состав ФГ входят:

- а) огневое и среднее днище;
- б) корпус ФГ;
- в) двухкомпонентные газожидкостные форсунки;
- г) центробежные однокомпонентные форсунки горючего;
- д) пусковая форсунка горючего.

Корпус ФГ представляет собой несущее кольцо с радиальными отверстиями по всей длине для подвода горючего из охлаждающего тракта. Крепление корпуса ФГ к внутренней стенке камеры осуществляется сваркой, к газоводу – пайкой. Днища ФГ представляют собой решетки с отверстиями под форсунки. Крепление днищ к корпусу осуществляется сваркой, форсунки к днищам крепятся пайкой.

ФГ имеет две полости: газовая, образованная средним днищем и газоводом, и жидкостная, образованная средним и огневым днищем. Спрямоляющая решетка, ввариваемая в газовод, служит для выравнивания потока на входе в форсунки.

Впрыск компонентов осуществляется через форсунки, расположенные на концентрических окружностях. В центре ФГ установлена центробежная форсунка для пускового горючего ПГ-2. Ее использование обусловлено многократностью запуска двигателя, а также тем, что компоненты топлива являются несамовоспламеняющимися. На первых трех окружностях расположены струйные двухкомпонентные газожидкостные форсунки

одинакового расхода. На четвертой окружности расположены однокомпонентные центробежные форсунки горючего.

Применение струйных газожидкостных форсунок обусловлено схемой «газ-жидкость». Именно эти форсунки позволяют добиться максимального значения φ_{β} . Расположение двухкомпонентных форсунок может быть реализовано по любой существующей схеме, но при выборе необходимо учитывать возможность возникновения неустойчивого горения и прогара ФГ. Основываясь на вышесказанном применим концентрическую схему расположения форсунок.

Применение однокомпонентных форсунок горючего обусловлено необходимостью понижения массового соотношения компонентов для создания пристеночного слоя и, как следствие, понижения температуры вблизи стенки камеры.

Основную опасность для огневого днища представляет большой теплоподвод от ядра пламени. Зоны распыления и испарения в данном случае служат защитой, но при больших расстояниях между форсунками могут появиться участки ФГ, не защищенные от обратных токов горячих ПС. Это может привести к прогару ФГ. Поэтому минимальное расстояние установки форсунок в данном случае определяется условиями прочности огневого днища, а также технологическими соображениями.

Проведем расчет ФГ:

- 1) В соответствии с рис.3.6 [2] определим шаг между форсунками:

$$H=22\text{мм.}$$

- 2) Определим число концентрических окружностей ($N_{\text{КО}}$) по формуле:

$$N_{\text{КО}} = \frac{\frac{D_{\text{КС}} - H}{2}}{H} \quad (38)$$

Получаем $N_{\text{КО}}=6,77$. Примем $N_{\text{КО}}=7$.

- 3) Диаметры концентрических окружностей: $D_n=2 \cdot H \cdot n$, n – номер окружности. Результаты занесены в таблицу 6.

Таблица 8 – Диаметры концентрических окружностей.

№ окружности	1	2	3	4	5	6	7
Диаметр, мм	44	88	132	176	220	264	308

4) Число форсунок на окружностях: $Z_n = \pi * D_n / H$

Результаты занесены в таблицу 7.

Таблица 9 – Число форсунок на концентрических окружностях.

№ окружности	1	2	3	4	5	6	7
Число форсунок	6	12	19	25	31	38	44

Общее число форсунок с учетом центральной пусковой форсунки:
 $Z_{\Sigma} = 176$.

Число форсунок пристеночного слоя: $Z_{\text{ПС}} = 44$.

5) Определим расходы компонентов через форсунки по формулам (зададимся расходом через форсунки пристеночного слоя в 2 раза меньшим, чем через основные):

$$\dot{m}_{\text{фГ}} = \frac{\dot{m}'_{\text{Г}}}{Z_{\Sigma} - 1 - \frac{Z_{\text{ПС}}}{2}}; \quad (39)$$

$$\dot{m}_{\text{фОк}} = \frac{\dot{m}'_{\text{Ок}}}{Z_{\Sigma} - 1 - Z_{\text{ПС}}}; \quad (40)$$

$$\dot{m}_{\text{фПС}} = \frac{\dot{m}_{\text{Г}} - \dot{m}_{\text{фГ}} * (Z_{\Sigma} - 1 - Z_{\text{ПС}})}{Z_{\text{ПС}}}, \quad (41)$$

где $\dot{m}_{\text{фГ}}$ - массовый расход горючего через газожидкостную форсунку, кг/с;

$\dot{m}_{\text{фОк}}$ - массовый расход окислителя через газожидкостную форсунку, кг/с;

$\dot{m}_{\text{фПС}}$ – массовый расход горючего через форсунки пристеночного слоя, кг/с.

Получаем: $\dot{m}_{\text{фГ}} = 0,432$ кг/с; $\dot{m}_{\text{фОк}} = 1,393$ кг/с; $\dot{m}_{\text{фПС}} = 0,216$ кг/с.

5.3.1. Расчет двухкомпонентной струйной газожидкостной форсунки

Расчет любых двухкомпонентных форсунок сводится к расчету двух отдельных форсунок с учетом их взаимного влияния друг на друга. Поэтому для расчета используются те же уравнения, что и для расчета однокомпонентных форсунок с небольшими изменениями.

Расчет газовой части форсунки.

1) Вычислим плотность газа на выходе из форсунки по формуле:

$$\rho_2 = \rho_1 * \left(\frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{фОк}}} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (42)$$

где $\rho_1 = 50 \text{ кг/м}^3$ - плотность генераторного газа на входе в форсунки;

$P_2 = P_k$ – давление на выходе из форсунки.

2) Определение скорости истечения газа (режим докритический) произведем по формуле:

$$W_2 = \sqrt{2 * \frac{n}{n-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left(1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)}; \quad (43)$$

где P_1 - давление генераторного газа на входе в форсунку.

3) Определим площадь и диаметр сопла форсунки по формуле. Для этого зададимся значением коэффициента расхода форсунки $\mu=0,85$:

$$F_c = \frac{\dot{m}_{\text{фОк}}}{\mu * \sqrt{2 \rho_2 \Delta P_{\text{фОк}}}}. \quad (44)$$

4) Длина сопла форсунки в соответствии с рекомендациями [1] принимается в 1,5-3 раза больше диаметра сопла. Тогда $l_c = (1,5 \dots 3) * d_c$

- 5) Для расчета диаметра втулки зададимся толщиной стенки в 1 мм, тогда $d_{вт}=d_c+2*0,001$.

Расчет жидкостной части форсунки.

- 1) Задаем угол сопла $\alpha=30^\circ$, число входов: $i=4$.
- 2) Коэффициент расхода для таких форсунок определяется после проливок и испытаний. В соответствии с имеющимися значениями зададимся $\mu=0,55$.
- 3) Диаметр сопла форсунки определится по формуле:

$$d_c = \sqrt{\frac{4}{\pi} * \frac{\dot{m}_{фГ}}{i * \mu * \sqrt{2 * \rho_{Г} \Delta P_{фГ}}}}. \quad (45)$$

5.3.2. Расчет однокомпонентной форсунки горючего

- 1) Зададим угол распыла $\alpha=45^\circ$, число входов $i=2$.
- 2) По углу 2α и в соответствии с рис.3.13 [2] определяем коэффициент расхода и геометрическую характеристику форсунки. $\mu=0,21$, $A=3,0$.
- 3) Вычисляем диаметр сопла форсунки по формуле:

$$D_c = \sqrt{\frac{4}{\pi} * \frac{\dot{m}_{фПС}}{\mu * \sqrt{2 * \rho_{Г} \Delta P_{фПС}}}}. \quad (46)$$

- 4) Зададим радиус закрутки: $R_3=1,3*D_c/2=3$ мм.
- 5) Радиус входного сечения:

$$r_{вх} = \sqrt{\frac{R_3 * r_c}{i * A}}. \quad (47)$$

- 6) Определение скорости истечения, приведенного диаметра и числа Рейнольдса:

$$W_{вх} = \frac{4 * \dot{m}_{фПС}}{\pi * i * d_{вх}^2 * \rho_{Г}}, \quad (48)$$

$$D_{пр} = 2 * r_{вх} * \sqrt{i}, \quad (49)$$

$$Re_{\text{вх}} = \frac{W_{\text{вх}} * D_{\text{пр}}}{\nu_{\Gamma}}, \quad (50)$$

где $D_{\text{пр}}$ - приведенный диаметр, м;

$Re_{\text{вх}}$ - число Рейнольдса на входе в камеру закручивания;

ν_{Γ} – коэффициент кинематической вязкости горючего, м/с^2 .

7) Рассчитаем коэффициент трения по формуле Конакова:

$$\lambda = (1,8 \lg(Re) - 1,5)^{-2} \quad (51)$$

Получаем $\lambda = 0,0196$.

8) Определяем эквивалентную геометрическую характеристику:

$$A_3 = \frac{R_3 * r_c}{i * r_{\text{вх}}^2 + \frac{\lambda}{2} (R_3 - r_c) * R_3}. \quad (52)$$

Имеем $A_3 = 2,9738$

9) Определяем относительную разницу A и A_3 : 0,9%, что меньше 3%, следовательно, рассчитанные размеры можно считать окончательными.

10) Вычислим диаметр камеры закручивания: $d_{\text{КЗ}} = d_{\text{вх}} + 2 * R_3 = 8,5$ мм.

11) Длину входного отверстия выбираем в диапазоне 1,5-3 от $d_{\text{вх}}$:
 $l_{\text{вх}} = 1,5 * d_{\text{вх}} = 2$ мм.

12) Длина сопла находится в диапазоне 0,25-1 от D_c : $l_c = 0,7 * D_c = 3$ мм.

Эскизы форсунок с размерами изображены на чертеже (КП А8МЗ103.2018.200 лист 2).

5.4. Расчет массового соотношения компонентов в ядре потока и в пристеночном слое

Исходными данными для расчета являются расходы компонентов через форсунки, расположение форсунок на ФГ.

Массовое соотношение компонентов в ядре потока равно отношению расхода окислителя к расходу горючего в основных форсунках, так как применены двухкомпонентные форсунки.

$$K_{m_я} = \frac{\dot{m}_{\phi 0к}}{\dot{m}_{\phi Г}}, \quad (53)$$

где $K_{m_я}$ – массовое соотношение компонентов в ядре потока.

Имеем $K_{m_я} = 3,22$.

Расчет массового соотношения в пристеночном слое проведем по вероятностному методу:

- 1) Выделим элемент на периферии ФГ с размерами $(H \cdot H/2)$, где H – шаг форсунок, вокруг него очертим окружность радиусом $3H$.
- 2) Далее в соответствии с расчетной схемой, представленной на чертеже (КП А8М3103.2018.200 лист 2), определим координаты всех попавших в зону форсунок. Координаты представлены в таблице 11.
- 3) Далее определяются значения безразмерного комплекса:

$$Z_{x,y} = \frac{X_{1,2}, Y_1}{H\sqrt{2}} \quad (54)$$

- 4) Затем по табл.3.2 [2] определяются значения функции Лапласа. Значения занесены в таблицу 12.
- 5) Массовое соотношение компонентов в пристеночном слое ищем по формуле:

$$K_{m_ст} = \frac{\dot{m}_{\phi 0к} * \sum n_{\phi 0к} (\Phi_{x2} - \Phi_{x1}) * (1 - \Phi_{y1})}{\dot{m}_{\phi Г} * \sum n_{\phi Г} (\Phi_{x2} - \Phi_{x1}) * (1 - \Phi_{y1}) + \dot{m}_{\phi ПС} \sum n_{\phi ПС} (\Phi_{x2} - \Phi_{x1}) * (1 - \Phi_{y1})} \quad (41)$$

Получаем $K_{m_ст} = 1,536$.

5.5. Расчет регенеративного охлаждения

Высокие значения торможения термодинамических параметров в камере РД обуславливают интенсивный теплообмен между ПС и внутренними стенками камеры. Удельные тепловые потоки в ЖРД несопоставимо больше соответствующих значений в других тепловых машинах. Поэтому эффективное охлаждение камеры остается наиболее трудным и важным аспектом в проектировании ЖРД.

Существует два основных способа охлаждения: наружное и внутреннее.

Для организации наружного охлаждения обычно используют один из компонентов топлива. Подвод его осуществляется через коллектор в тракт охлаждения, пройдя который компонент нагревается и охлаждает стенки камеры, затем компонент поступает в КС.

Внутренне (завесное) охлаждение используется при недостаточности наружного, так как при его использовании уменьшается удельный импульс вследствие того, что впрыснутый через завесу компонент не участвует в горении.

Для проектируемого двигателя вследствие применения схемы с дожиганием генераторного газа надежное охлаждение возможно обеспечить при применении регенеративного охлаждения с двумя поясами завес: в начале КС и перед ДЗЧ сопла. Массовый расход охладителя в данном случае не превысит 3-4%, в то время как для достижения аналогичной температуры с помощью только пристеночного слоя массовый расход составит порядка 20%.

К системе охлаждения предъявляются следующие требования:

- 1) Температура стенки со стороны газа не должна превышать допустимых по условиям прочности значений для выбранного материала;
- 2) Температура жидкости на выходе из охлаждающего тракта не должна превысить температуру кипения компонента при заданном давлении;

- 3) Температура жидкости у стенки не должна превысить температуру коксообразования;
- 4) Температура охладителя у стенки не должна превысить температуру разложения.

Расчет охлаждения имеет поверочный характер. Охлаждающим компонентом выбираем РГ-1. Разбиваем камеру двадцатью сечениями: 4 сечения в КС, 7 сечения в ДЗЧ сопла и 9 сечений в СЗЧ сопла. Вследствие повышенных удельных тепловых потоков и сложности течения в ДЗЧ шаг сечений в районе критики принимается меньшим.

Расчет проточного внешнего регенеративного охлаждения.

Промежуточные и окончательные результаты расчета представлены в таблице 13 приложения 1.

- 1) Исходными данными для расчета являются: среднее массовое соотношение компонентов в КС, расходы компонентов, геометрические параметры камеры, результаты термодинамического расчета.
- 2) Определение в соответствии с профилем камеры положения сечений, их диаметров и углов наклона (γ) профиля в месте сечения.
- 3) Определение относительного диаметра по формуле:

$$\bar{D} = \frac{D_i}{D_*}, \quad (55)$$

где D_i - текущий диаметр.

- 4) По приложению 1 [1] определяем значения функции от относительного диаметра $f(\bar{D})$.
- 5) Находим промежуточный параметр в виде: $\frac{f(\bar{D})}{\cos(\gamma)}$.
- 6) Относительная абсцисса сечения находится по формуле:

$$\bar{x}_1 = \frac{x_1}{D_*}. \quad (56)$$

- 7) Относительная длина и относительный диаметр КС:

$$\bar{L}_{KC} = \frac{L_K}{D_*} \quad (57)$$

$$\bar{D}_{KC} = \frac{D_K}{D_*} \quad (58)$$

8) Эффективную температуру торможения примем из интервала 1800-2200K

$$T_{эфф_0} = 1900K.$$

9) В качестве первого приближения задаем постоянную по длине камеры температуру газовой стенки для начала решения $T_{г_ст} = 800K$. После получения значений температур газовой и жидкостной стенок, необходимо выполнить корректировку значений по данному пункту и повторно провести расчет.

10) Относительная температура определяется по формуле:

$$\bar{T}_{г_ст} = \frac{T_{г_ст}}{T_{эфф_0}} \quad (59)$$

11) По рис.4.5 (в) [2] определяем теплоемкость (C_p), коэффициент динамической вязкости (μ) и газовую постоянную (R) в пристеночном слое.

12) Определяем по рис.1.3,1.4 [2] комплекс $K = 1/a_T b_T D^{1,2}$.

13) Находим промежуточное значение интеграла:

$$\int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}_i} \frac{f(\bar{D})}{\cos(\gamma_i)} d\bar{x} \quad (60)$$

14) Принимаем давление заторможенного потока равным давлению в КС за счет того, что камера изобарическая.

15) Вычисляем число Рейнольдса:

$$Re_0 = 3,46 * \frac{D_* * P_k}{\mu * \sqrt{R * T_{эфф_0}}} \quad (61)$$

16) Вычислим комплекс Z_T :

$$Z_T = Re_0 * K \left(0,142 * \frac{\bar{L}_{KC}}{\bar{D}_{KC}^{0,8}} + \int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}_i} \frac{f(\bar{D})}{\cos(\gamma_i)} d\bar{x} \right) \quad (62)$$

17) По рис.4.10 [2] определим значение функции ψ_T

18) Определим значение комплекса b_T :

$$b_T = 1 + 1,5 * \bar{T}_{г-ст}^{0,728} \quad (63)$$

19) Конвективный тепловой поток определится из формулы:

$$q_K = \frac{3,98 * \frac{f(\bar{D})}{\bar{D}_i^{1,2}} * C_p * T_{эфф-0} * P_K * (1 - \bar{T}_{г-ст})}{b_T^2 * \psi_T^2 * \sqrt{R * T_{эфф-0}}} \quad (64)$$

20) Далее необходимо определить лучистый тепловой поток:

Исходные данные: мольные доли воды и углекислого газа из термодинамического расчета: $r(\text{CO}_2)$, $r(\text{H}_2\text{O})$.

21) Парциальные давления компонентов в соответствии с законом Дальтона:

$$P_{H_2O} = P_K * r_{H_2O}$$

$$P_{CO_2} = P_K * r_{CO_2}$$

22) Пользуясь рис.4.21,4.22,4.24 [1] определяем излучательную способность паров воды ε_{H_2O} и углекислого газа ε_{CO_2} .

23) Степень черноты ПС определяется формулой:

$$\varepsilon_{ч} = \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2} - \varepsilon_{H_2O} * \varepsilon_{CO_2} \quad (65)$$

24) Определим эффективную излучательную способность стенки:

Для выбранного материала $\varepsilon_{ст}=0,57$.

$$\varepsilon_{ст-эфф} = \varepsilon_{ст} * (1 + (1 - \varepsilon_{ст}) * (1 - \varepsilon_{ч})) \quad (66)$$

25) Ищем лучистый тепловой поток:

$$q_L = \varepsilon_{ст-эфф} * \varepsilon_{ч} * C_0 * \left(\frac{T'}{100}\right)^4 \quad (67)$$

26) Лучистый тепловой поток при наличии пристеночного слоя:

$$\psi = \frac{D_{КС} - 2H}{D_{КС}} \frac{L_{КС} - 2H}{L_{КС}} \quad (68)$$

$$q_{л-пр} = 0,65 * \psi * \varepsilon_{ст-эфф} * q_L \quad (69)$$

27) Рассмотрим распределение лучистого потока по длине камеры:

От 0-го до 1-го сечения поток растет до значения в пристеночном слое; от 1-го до 3-го сечения поток постоянен и равен $q_{л_пр}$; в ДЗЧ аппроксимируем соотношением:

$$q_{л_i} = q_{л_пр} (1 - 12,5 * (1,2 - \bar{D}_i)^2) \quad (70)$$

В СЗЧ сопла аппроксимирующим соотношением является формула:

$$q_{л_i} = q_{л_пр} * \frac{0,5}{\bar{D}_i} \quad (71)$$

28) Определяем суммарный тепловой поток:

$$q_{\Sigma_i} = q_{к_i} + q_{л_i} \quad (72)$$

Конвективный, лучистый и суммарный тепловые потоки представлены на рисунке 4.

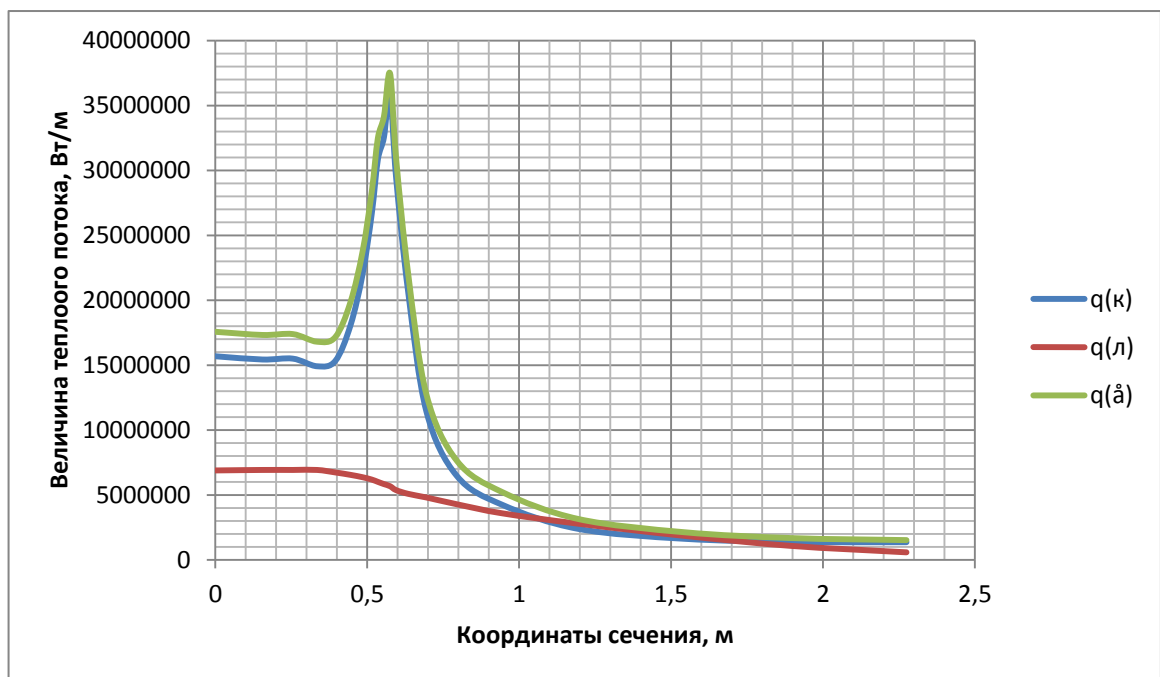


Рисунок 4 – Зависимость тепловых потоков от координаты сечения.

29) Определение длины участков

$$\Delta l_j = x_{j+1} - x_j \quad (73)$$

30) Определение площадь блокированной поверхности участка:

$$\Delta F_j = \pi \frac{(D_j + D_{j+1})}{2} * \Delta l_j \quad (74)$$

31) Теплосъем на участке определится уравнением:

$$Q_j = \frac{q_{\Sigma j} + q_{\Sigma j+1}}{2} * \Delta F_j \quad (75)$$

32) Массовый расход охладителя в тракт: $\dot{m}_{\text{охл}}$, температура охладителя на входе $T_{\text{ж_вх}}$.

33) Определим подогрев жидкости на участках:

$$\Delta T = \frac{Q_j}{C_{1-j} * \dot{m}_{\text{охл}}}, \quad (76)$$

где C_{1-j} – теплоемкость охладителя на участках.

34) Определим температуру охладителя на входе и выходе из участков:

$$T_{\text{ж_вых}j} = T_{\text{ж_вых}j+1} + \Delta T_{15-j} \quad (77)$$

$$T_{\text{ж_вх}j} = T_{\text{ж_вх}j+1} + \Delta T_{15-j} \quad (78)$$

35) Температуру жидкости на участке примем равной среднему арифметическому между входной и выходной температурой.

36) По рис. 4.25 [1] найдем значения комплекса изотермичности $Z\Psi_T$.

37) Определим диаметр канала охлаждения. Для этого зададимся толщиной внутренней стенки $\delta_{\text{ст}}$, высотой канала h . Тогда диаметр равен:

$$D_{\text{охл}i} = D_i + 2 * \delta_{\text{ст}} + h \quad (79)$$

38) Зададимся толщиной гофра $\delta_{\text{г}}$ и числом ребер гофра $n_{\text{р}}$. Тогда ширина канала:

$$e_{k-i} = \frac{\pi * D_{\text{охл}i} - \delta_{\text{г}} * n_{\text{р}i}}{n_{\text{р}i}} + \delta_{\text{г}} * \frac{\pi * D_{\text{охл}i}}{n_{\text{р}i} * (h - \delta_{\text{г}})} \quad (80)$$

39) Эквивалентный диаметр определим по формуле:

$$D_{\text{э}i} = \frac{2 * e_{k-i} * (h - \delta_{\text{г}})}{e_{k-i} + (h - \delta_{\text{г}})} \quad (81)$$

40) Определим площадь живого сечения охлаждающего тракта:

$$F_{\text{ж}i} = 2 * n_{\text{р}i} * e_{k-i} * (h - \delta_{\text{г}}) \quad (82)$$

41) Коэффициент теплоотдачи определится формулой:

$$\alpha_{ж_j} = K * Z \Psi_{Tj} * \frac{0,021}{D_{э_j}^{0,2}} * \left(\frac{\dot{m}_{охл}}{F_{ж_j}}\right)^{0,8} \quad (83)$$

42) Зададим теплопроводность гофров $\lambda_r=291\text{Вт/м*К}$. Коэффициент эффективности оребрения определится формулой:

$$\eta_{p_j} = \frac{2}{a} \left(e_{k_i} + \frac{2th(mh)}{m} \right) \quad (84)$$

$$\text{где } m = \sqrt{\frac{2\alpha_{ж_j}}{\delta_r \lambda_r}}$$

43) Коэффициент теплоотдачи с учетом оребрения:

$$\alpha_{ж_p_j} = \eta_{p_j} * \alpha_{ж_j} \quad (85)$$

44) Определим температуру жидкостной стенки:

$$T_{ж_стj} = \frac{q_{\Sigma_j}}{\alpha_{ж_p_j}} + T_{ж_j} \quad (86)$$

45) Среднюю температуру стенки определим как среднее арифметическое между температурами газовой и жидкостной стенки.

46) По рис.4.40 [1] определим коэффициент теплопроводности стенки $\lambda_{ст_j}$.

47) Определим температуру газовой стенки по формуле:

$$T_{г_стj} = \frac{q_{\Sigma_j} * \delta_{ст}}{\lambda_{ст_j}} + T_{ж_стj} \quad (87)$$

48) Рассчитаем погрешность относительно заданной температуры газовой стенки.

Для наглядности на рисунке 5 представлено распределение температуры газовой стенки по сечениям.

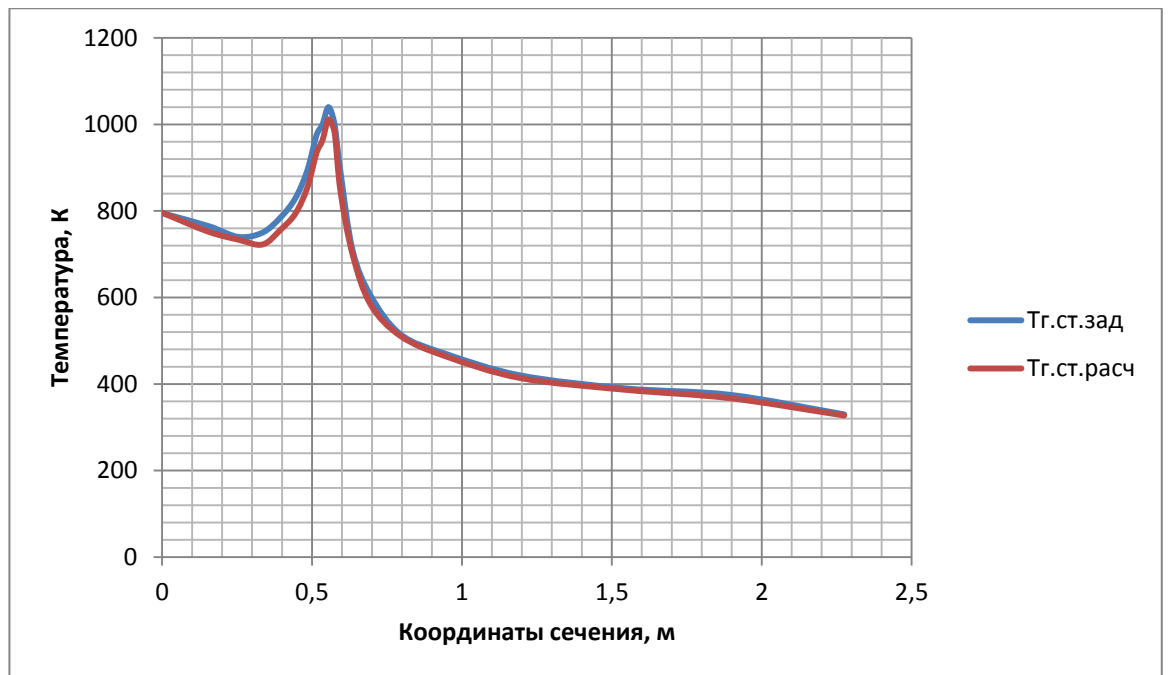


Рисунок 5 – Распределение температуры газовой стенки по сечениям камеры

Из рисунков и таблицы (см. приложение 1) видно, что погрешность не превысила 5%, температура жидкостной стенки не превысила температуру коксообразования для РГ-1, Температура газовой стенки оказалась в пределах допустимой для заданного материала. Охлаждение можно считать удовлетворительным.

Учитывая граничные значения температур применим две завесы: в начале камеры и в начале ДЗЧ сопла. В результате их применения удельные характеристики камеры снизятся, но вероятность прогара значительно уменьшится.

6. РАБОТА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Камера сгорания работает при высоких значениях температуры и давления ПС. Значительные тепловые потоки отводятся организацией наружного и внутреннего охлаждения. Также устойчивой работе камеры способствует хорошая организация процесса горения.

Камера сгорания работает на несамовоспламеняющихся компонентах. Поэтому для воспламенения применена пусковая центробежная форсунка, которая подает горючее, позволяющее с высокой степенью надежности организовать процесс горения.

Окислитель поступает в КС в виде окислительного генераторного газа, горючее подводится к коллектору через два штуцера подвода, равномерно распределяется по охлаждающему тракту и, двигаясь к ФГ, охлаждает внутренние стенки камеры и частично впрыскивается через завесы с тангенциальной составляющей скорости.

Компоненты впрыскиваются в КС через двухкомпонентные струйные газожидкостные форсунки и однокомпонентные центробежные форсунки горючего, далее происходят процессы смесеобразования и горение компонентов с образованием ПС.

7. НОМЕНКЛАТУРА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Таблица 8 – Используемые материалы.

Внутреннее днище	БрХ08
Форсунки «Г»	БрХ08
Внутренние стенки КС	БрХ08
Завеса	БрХ08
Средняя часть КС	БрХ08
Первая секция сопла	БрХ08
Двухкомпонентные форсунки	X18H10T
Среднее днище (и его детали)	X18H10T
Наружная рубашка	X18H10T
Коллектор	X18H10T
Переходные кольца	12X21H5T
Остальное	Никелевый сплав

Пайка

Для пайки узлов КС и сопла (рубашки)	Г40НХ
Для пайки форсунок	ПСr39

8. РАСЧЕТ ДРОССЕЛЬНОЙ И ВЫСОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИК

Характеристика РД – это зависимость тяги или удельного импульса от какого-либо внутреннего или внешнего параметра при постоянстве остальных.

8.1. Расчет дроссельной характеристики

Дроссельная характеристика – это зависимость тяги и удельного импульса от давления в КС при постоянстве остальных параметров:

- 1) Геометрические размеры;
- 2) Соотношение компонентов топлива;
- 3) Давление окружающей среды ($P_H = P_a$).

$$P = f(P_k) = P_{\Pi} - F_a * P_a = \frac{I_{уд}^{\Pi} * F_*}{\beta_T} P_k - F_a * P_a \quad (88)$$

$$I_{уд} = I_{уд}^{\Pi} - \frac{F_a * P_a}{\dot{m}} = I_{уд}^{\Pi} - \beta_T \frac{F_a P_a}{F_* P_k} \quad (89)$$

Данные зависимости позволяют построить дроссельную характеристику. Зададимся несколькими значениями давления в КС и рассчитаем значения тяги и удельного импульса. Результаты расчета показаны в таблице и на графике.

Таблица 9 – Дроссельная характеристика.

P_k , МПа	0	3	6	9	12	15	18	21	24
P , кН	-29,8	92,5	214,9	337,2	459,6	581,98	704,35	826,72	949,1
$I_{уд}$, м/с	-	2780	3228	3378	3453	3497	3527	3549	3565
$I_{уд}^{\Pi}$, м/с	3677								

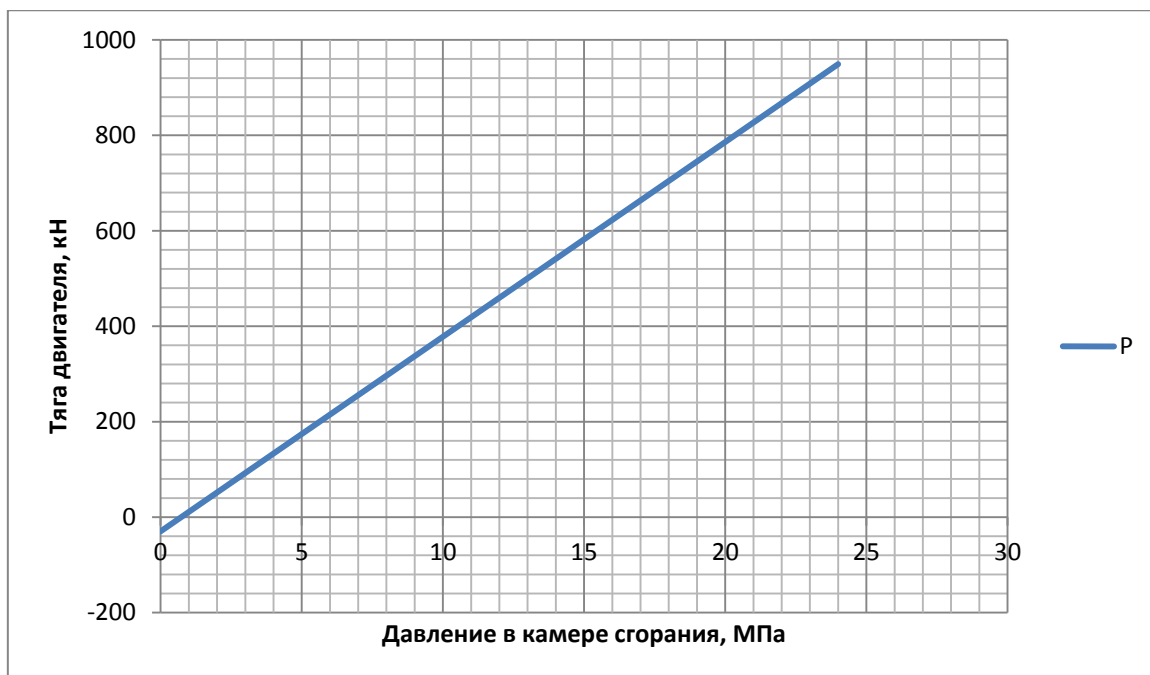


Рисунок 6 – Зависимость тяги от давления в КС.

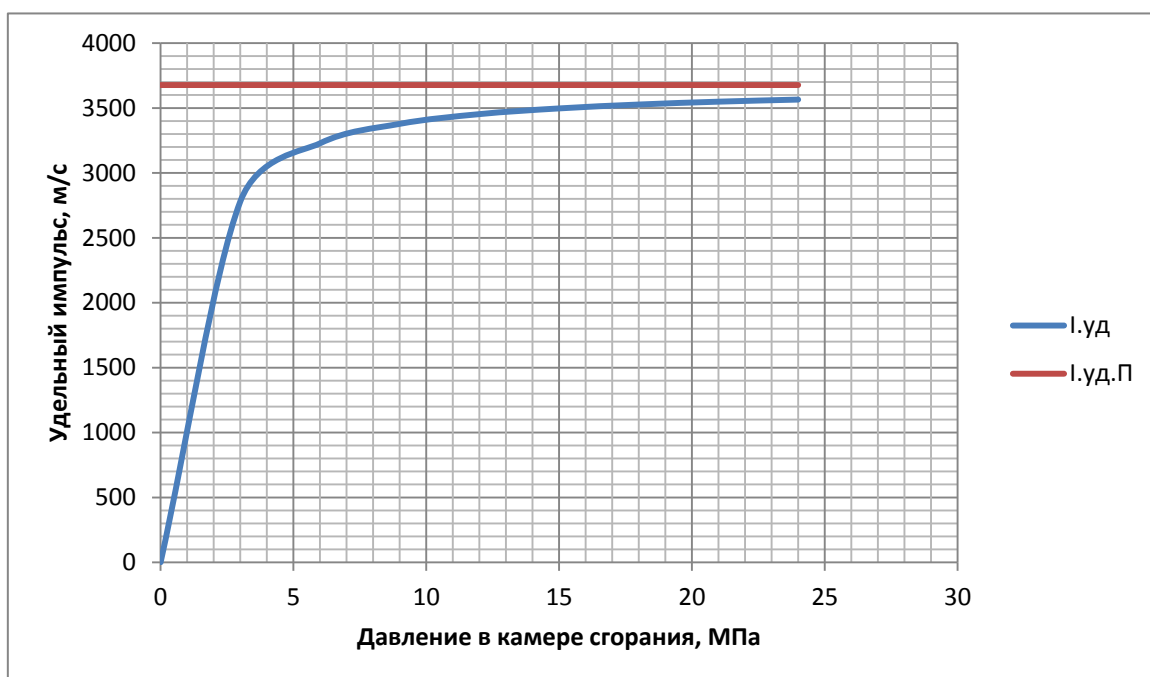


Рисунок 7 – Зависимость удельного импульса от давления в КС.

8.2. Расчет высотной характеристики

Высотная характеристика это зависимость тяги или удельного импульса от давления в окружающей среде или высоты над уровнем моря при постоянстве остальных параметров:

- 1) Геометрические размеры;
- 2) Соотношение компонентов топлива;
- 3) Давление в КС.

$$P = f(P_H) = P_{\Pi} - F_a * P_H \quad (90)$$

$$I_{уд} = I_{уд}^{\Pi} - \frac{F_a * P_a}{\dot{m}} = I_{уд}^{\Pi} - \beta_{\tau} \frac{F_a P_H}{F_* P_k} \quad (91)$$

Данные зависимости позволяют построить высотную характеристику. Зададимся несколькими значениями давления окружающей среды и рассчитаем значения тяги и удельного импульса. Результаты расчета показаны в таблице и на графике.

Таблица 10 – Высотная характеристика.

P_H , МПа	0	0,003	0,006	0,009	0,012	0,015	0,018	0,021	0,024
P , кН	850	844	838,	832	826	820	814	808	802
$I_{уд}$, м/с	3677	3651	3626	3600	3575	3549	3523	3498	3472
$I_{уд}^{\Pi}$, м/с	3677								

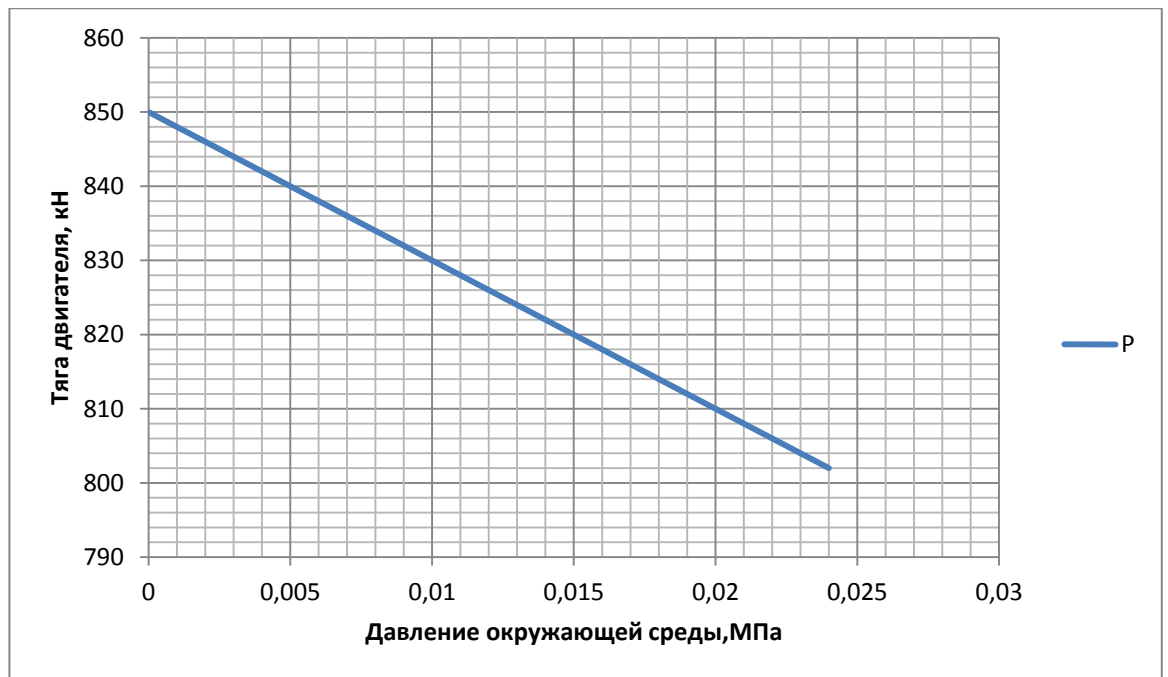


Рисунок 8 – Зависимость тяги от давления окружающей среды.

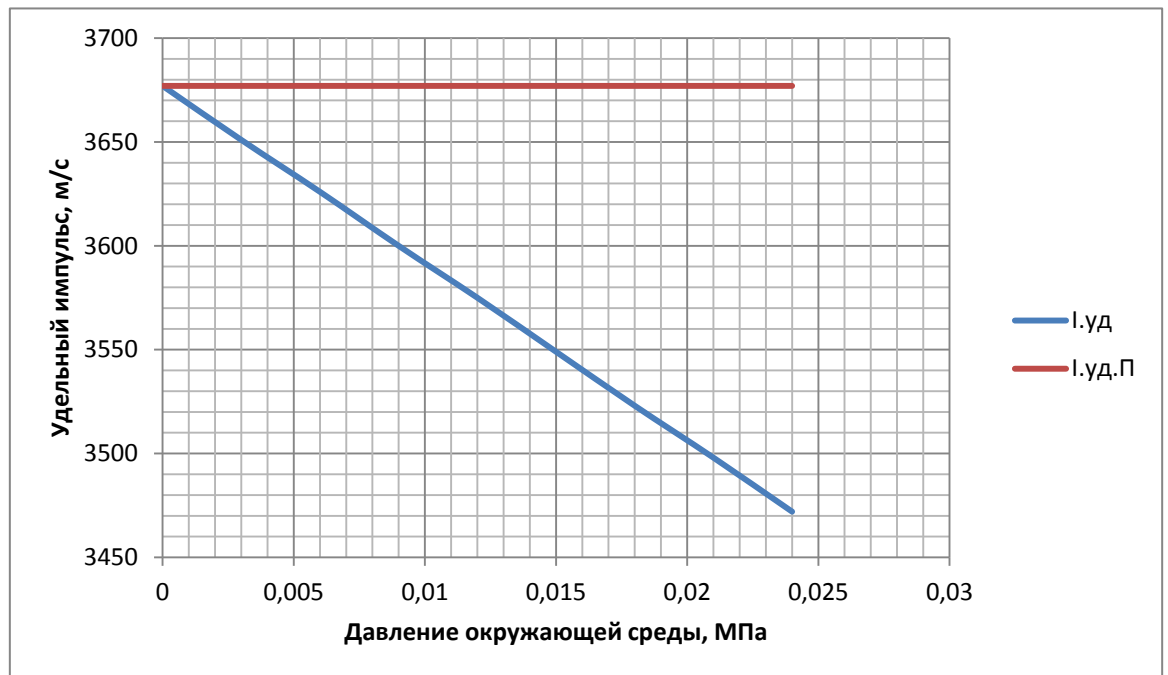


Рисунок 9 – Зависимость удельного импульса от давления окружающей среды.

9. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАМЕРЫ ДВИГАТЕЛЯ

Потери давления в охлаждающем тракте вызываются трением и местным сопротивлением. Поэтому:

$$\Delta P_{\text{охл}} = \sum_i (\Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{д}})_i \quad (92)$$

Где $\Delta P_{\text{тр}}$ – потери на трение, $\Delta P_{\text{м}}$ – местные потери, $\Delta P_{\text{д}}$ – изменение давления, связанное с изменением динамического напора жидкости; i – номер участка камеры (обычно принимается тот же, что и в расчете охлаждения).

Формулы для расчета, относящиеся к одному участку, расположенному между сечениями i и $i+1$.

1) Потери давления на трение:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \Delta L \quad (93)$$

$$\text{Где } A_i = \frac{\lambda_i \rho_i w_i^2}{d_{\text{э}i} 2} \quad (94)$$

ΔL – длина участка; $d_{\text{э}i}$ – эквивалентный диаметр i -го проходного сечения:

Для гофрированной поверхности:

$$d_{\text{э}i} = \frac{2eh_1}{e + h_1} \quad (95)$$

Где $h_1 = h - \delta_{\text{г}}$, $\delta_{\text{г}}$ – толщина гофра; λ_i – коэффициент трения:

$$\lambda_i = \lambda_0 \omega \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25} \quad (96)$$

Формулу расчета λ_0 и значение ω выбираем исходя из рекомендаций [2].

2) Потери напора от местных сопротивлений:

$$\Delta P_{\text{м}} = \xi \rho \frac{w^2}{2} \quad (97)$$

Где ξ выбирается в соответствии со справочными данными [2].

3) Изменение давления, связанное с изменением динамического напора:

$$\Delta P_d = \left(\frac{\rho_i w_i^2}{2} - \frac{\rho_{i+1} w_{i+1}^2}{2} \right) \quad (98)$$

Результаты расчета по всем сечениям сведены в таблицу 15.

По результатам расчета построены зависимости изменения скорости и давления по длине двигателя (рис.10,11)

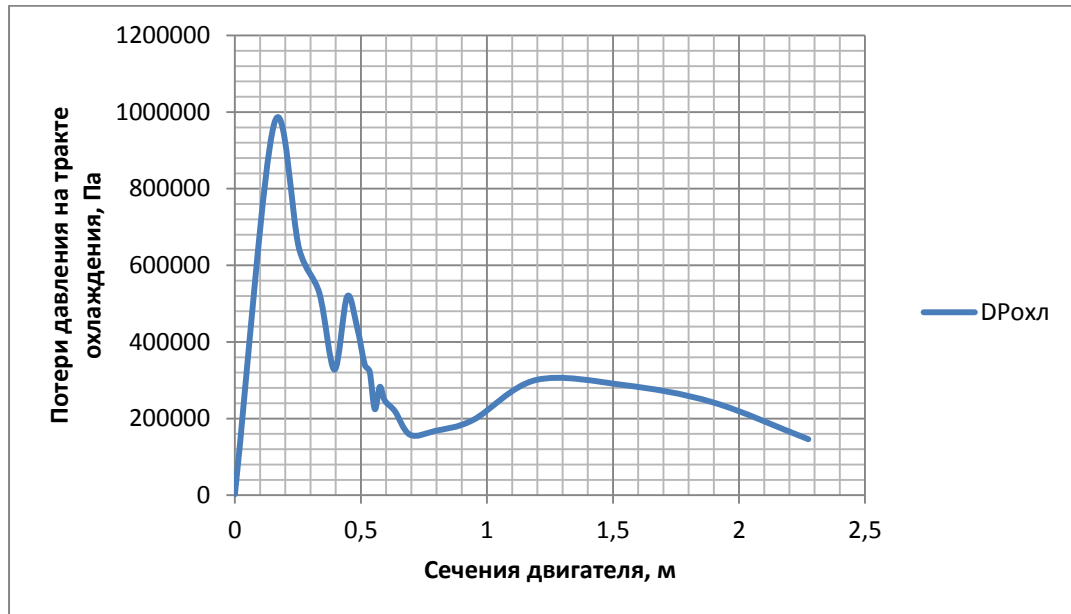


Рисунок 10 – зависимость изменения давления по длине двигателя

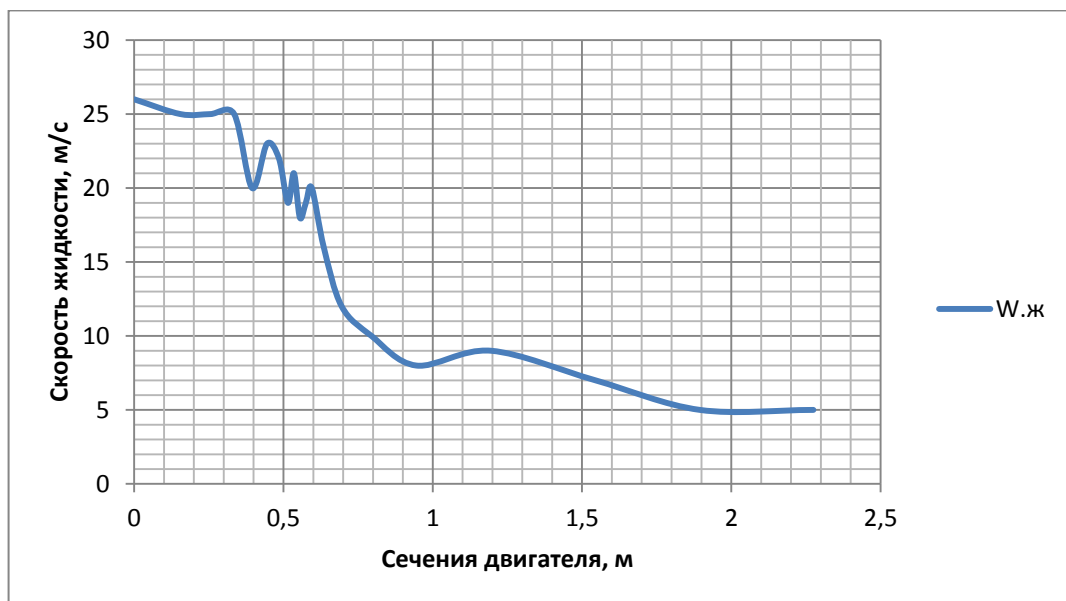


Рисунок 11 – зависимость изменения скорости жидкости по длине двигателя

10. РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ КАМЕРЫ РД

10.1 Общая несущая способность оболочек камеры

Для нахождения расчетной зависимости $P_r = f(\epsilon_{уп})$ и построения соответствующей кривой необходимо решить следующие уравнения:

- 1) Уравнения равновесия элемента оболочек в поперечном и продольном направлениях, выраженные в напряженных:

$$\sigma_y' h' + \sigma_y'' h'' = p_r R \quad (99)$$

$$\sigma_x' h' + \sigma_x'' h'' = k p_r R \quad (100)$$

где k – коэффициент осевого усилия, представляющий собой отношение осевого усилия в оболочках к окружному усилию. Значение коэффициента определяется в зависимости от расположения крепления камеры относительно расчетного сечения. Если узел крепления расположен в области критического сечения камеры, то $k = 0,5$. В случае расположения узла крепления в области головки в расчетном сечении дополнительно действует тяга P , поэтому:

$$k = 0,5 - \frac{P}{2\pi R^2 p_r} \quad (101)$$

- 2) Уравнения, связывающие полные, силовые и температурные деформации:

$$\epsilon_{хп}' = \epsilon_x' + \alpha' t' \quad (102)$$

$$\epsilon_{хп}'' = \epsilon_x'' + \alpha'' t'' \quad (103)$$

$$\epsilon_{уп}' = \epsilon_y' + \alpha' t' \quad (104)$$

$$\epsilon_{уп}'' = \epsilon_y'' + \alpha'' t'' \quad (105)$$

$$\epsilon_{хп}' = \epsilon_{хп}'' = \epsilon_{хп} \quad (106)$$

$$\epsilon_{уп}' = \epsilon_{уп}'' = \epsilon_{уп} \quad (107)$$

- 3) Физические уравнения теории упругопластических деформаций:

$$\sigma_x' = \frac{4}{3} \frac{\sigma_i'}{\epsilon_i'} (\epsilon_x' + 0,5 \epsilon_y') \quad (108)$$

$$\sigma''_x = \frac{4\sigma''_i}{3\epsilon''_i}(\epsilon''_x + 0,5\epsilon''_y) \quad (109)$$

$$\sigma'_y = \frac{4\sigma'_i}{3\epsilon'_i}(\epsilon'_y + 0,5\epsilon'_x) \quad (110)$$

$$\sigma''_y = \frac{4\sigma''_i}{3\epsilon''_i}(\epsilon''_y + 0,5\epsilon''_x) \quad (111)$$

Где ϵ_i – интенсивность деформированного состояния оболочки, причем:

$$\epsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_x \epsilon_y} \quad (112)$$

σ_i – интенсивность напряженного состояния оболочки, причем зависимость $\sigma_i = f(\epsilon_i)$ описывается диаграммой растяжения соответствующего материала.

Указанная выше система решается методом проб и ошибок для определения каждой точки расчетной диаграммы.

Расчет проводится в следующей последовательности:

- 1) Задается значение $\epsilon_{уп}$ (как координаты вдоль оси абсцисс расчетной кривой);
- 2) Для заданного значения $\epsilon_{уп}$ задается значение $\epsilon_{хп}$ (на первом шаге приближений $\epsilon_{хп} = 0,5 \dots 0,7\epsilon_{уп}$);
- 3) Вычисляются значения ϵ'_x , ϵ''_x , ϵ'_y , ϵ''_y , используя систему уравнений (102-107);
- 4) Вычисляются интенсивности деформированного состояния оболочек и определяются интенсивности напряженного состояния по диаграммам растяжения при соответствующих температурах;
- 5) Вычисляются напряжения σ'_x , σ''_x , σ'_y , σ''_y с использованием физических уравнений (108-111);
- 6) Проверяется выполнимость уравнений равновесия (99) и (100):

$$\sigma'_x h' + \sigma''_x h'' = k(\sigma'_y h' + \sigma''_y h'') \quad (113)$$

Если обе части уравнения (113) тождественно равны (с некоторой наперед заданной точностью), то определяется значение p_r из уравнения равновесия (99):

$$p_r = \frac{\sigma_y h' + \sigma''_y h''}{R} \quad (114)$$

Таким образом определяется первая точка расчетной кривой $p_r = f(\epsilon_{уп})$ и следует перейти снова к п.1.

Если уравнение (113) не выполняется, необходимо вернуться к п.2.

В конечном итоге расчет сводится к определению коэффициента запаса по общей несущей способности, который представляет собой:

$$n = \frac{p_{r.пред}}{p_{r.раб}} \quad (115)$$

Допустимое значение коэффициента запаса по общей несущей способности $n = 1,2 \dots 1,5$. В случае невыполнения условия необходимо изменить толщину наружной оболочки или использовать другой материал для ее изготовления.

Результаты расчета сведены в таблицу 16.

График полученной кривой $p_r = f(\epsilon_{уп})$ представлен на рис 12.

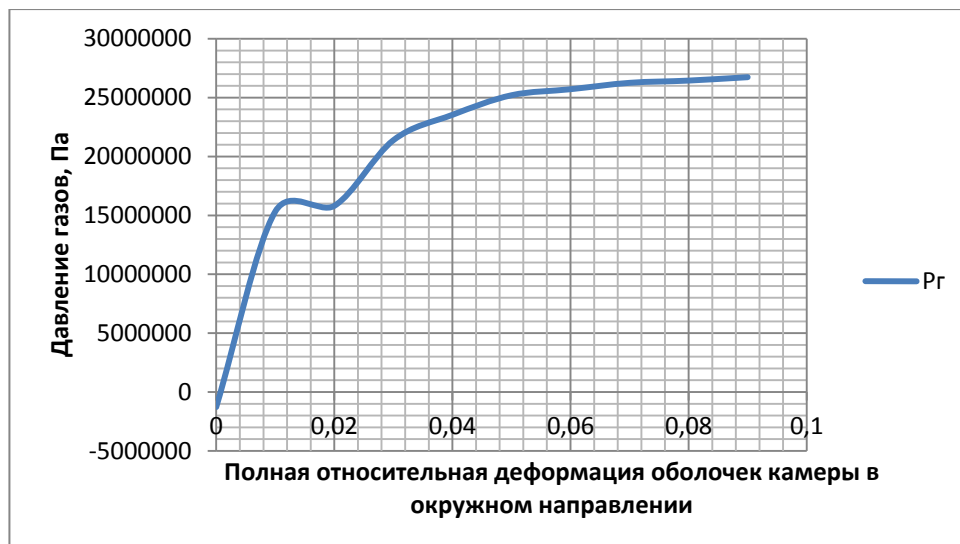


Рисунок 12 – кривая зависимости $p_r = f(\epsilon_{уп})$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с полученным заданием спроектированы и рассчитаны ПГС и камера РД на уровне предэскизного проектирования. Полученные параметры обеспечивают работу двигателя в соответствии с назначением и требованиями.

На основе анализа существующих схем ПГС выбрана закрытая схема питания с окислительным генераторным газом. Исходя из выбранной схемы двигателя, выбрана концентрическая схема расположения форсунок с применением двухкомпонентных струйных газожидкостных форсунок и однокомпонентных центростремительных форсунок горючего для создания пристеночного слоя. Применено проточное наружное регенеративное охлаждение с двумя поясами завес.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования. / М.В. Добровольский. – М: Машиностроение, 1968. – 398с.
2. Основы проектирования двигателей летательных аппаратов: учебное пособие. Ч III. Проектирование камер. / Е.С. Потехин, Ю.Н. Филимонов. 1990. – 99с.
3. Основы проектирования двигателей летательных аппаратов: учебное пособие. Ч IV. Расчет наружного проточного охлаждения. / Ю.Н. Филимонов, В.Т. Шевчук. 1990. – 69с.
4. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей: Учебник для студентов вузов по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки» / Г.Г. Гахун, В.И. Баулин, В.А. Володин и др.; Под общ. ред. Г.Г. Гахуна. – М.: Машиностроение, 1989. – 425с.
5. Штехер, М.С. Топлива и рабочие тела ракетных двигателей: Учебное пособие для авиационных вузов. / М.С. Штехер. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
6. Алемасов, В.Е., Дрегаллин, А.Ф., Тишин А.П., Худяков, В.А., Костин В.Н. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания / под ред. В.П. Глушко. – Т.2 – М.: Академия наук СССР, 1972. – 490 с.
7. Пинчук, В.А. Энергетические аспекты тепловых машин. Лекции.
8. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т./ В.И. Анурьев. – М.: Машиностроение, 1979.
9. Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей / Под ред. Л.С. Яновского. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 400 с.
10. Справочник сернокислотчика / под ред. Проф. К.М. Малина. – М.: Химия, 1971. – 744 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 11. Координаты форсунок

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
X1, мм	-0,02766	-0,00543	0,01657	-0,0434	-0,0219	0,0001	0,0214	-0,06402	-0,0492	-0,01653	0,00549	0,04202	-0,05439	-0,03292	-0,011	0,01092	0,03239	0,05297	-0,07497
X2, мм	-0,00566	0,01657	0,03857	-0,0214	-0,0001	0,0219	0,0434	-0,04202	-0,0272	0,00547	0,02749	0,06402	-0,03239	-0,01092	0,011	0,03292	0,05439	0,07497	-0,05297
У1, мм	0,03977	0,03864	0,04201	0,02054	0,01695	0,01695	0,02054	0,02762	0,04535	0,06067	0,06206	0,02762	0,00074	-0,00393	-0,0055	0,00393	0,00074	0,00842	0,00842

Таблица 12. Функция Лапласа

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Φ_{x1}	-0,7918	-0,1900	0,5465	-0,9319	-0,6778	0,0000	0,6708	-0,99642	-0,9745	-0,5465	0,2009	0,9229	-0,9877	-0,8661	-0,3794	0,3794	0,8586	0,9838	-0,99931
Φ_{x2}	-0,2009	0,5465	0,8931	-0,6708	0,0000	0,6778	0,9319	-0,9229	-0,7814	0,2009	0,7867	0,99642	-0,8586	-0,3794	0,3794	0,8661	0,9867	0,99931	-0,9838

Φ_{y1}
0,9048
0,8931
0,9229
0,6494
0,5549
0,5549
0,6494
0,7918
0,9611
0,9942
0,9951
0,7918
0,0226
-0,1459
-0,2009
0,1459
0,0226
0,2974
0,2974

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица 13 – Расчет охлаждения.

Сечение		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	D	0,319	0,319	0,319	0,319	0,3049	0,2725	0,23094	0,1963	0,176	0,164	0,159	0,184	0,237	0,3136	0,436	0,6073	0,8627	1,162	1,399	1,592
2	\bar{D}	2,00	2,00	2,00	2,00	1,91	1,71	1,45	1,23	1,10	1,03	1,00	1,15	1,49	1,97	2,74	3,81	5,41	7,29	8,78	9,99
3	$f(\bar{D})$	0,100	0,100	0,100	0,100	0,104	0,116	0,135	0,155	0,162	0,166	0,167	0,140	0,094	0,058	0,040	0,025	0,018	0,015	0,015	0,015
4	γ	0	0	0	0	0,218	0,401	0,524	0,524	0,384	0,209	0	0,585	0,576	0,559	0,524	0,497	0,436	0,358	0,288	0,195
4(1)	Cos(γ)	1	1	1	1	0,976	0,921	0,866	0,866	0,927	0,978	1	0,834	0,839	0,848	0,866	0,879	0,906	0,937	0,959	0,981
5	(3)/(4(1))	0,100	0,100	0,100	0,100	0,106	0,126	0,156	0,179	0,175	0,170	0,167	0,168	0,112	0,068	0,047	0,028	0,020	0,016	0,015	0,015
6	X1	0	0,155	0,255	0,335	0,395	0,445	0,485	0,515	0,535	0,555	0,575	0,595	0,635	0,695	0,795	0,945	1,195	1,545	1,895	2,275
7	\bar{X}_1	0	0,972	1,600	2,102	2,478	2,792	3,043	3,231	3,356	3,482	3,607	3,733	3,984	4,360	4,988	5,929	7,497	9,693	11,889	14,273
8	интеграл	0	0,097	0,160	0,210	0,263	0,350	0,475	0,577	0,586	0,590	0,604	0,626	0,447	0,297	0,233	0,169	0,150	0,154	0,184	0,216
9	\bar{L}_k	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353	2,353
	D_кс	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	параметр	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192
11	функция	0,043	0,043	0,043	0,043	0,048	0,061	0,087	0,120	0,144	0,160	0,167	0,118	0,058	0,026	0,012	0,005	0,002	0,001	0,001	0,001
12	(8)+(10)	0,192	0,289	0,352	0,402	0,455	0,542	0,667	0,769	0,778	0,782	0,796	0,818	0,639	0,489	0,425	0,361	0,342	0,346	0,376	0,408
13	Т.г.ст	795	765	740	750	785	830	895	975	1000	1040	1000	890	710	605	515	470	420	390	375	330
14	Km.ст	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54
15	Т.10	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900
16	_Т.г.ст_	0,42	0,40	0,39	0,39	0,41	0,44	0,47	0,51	0,53	0,55	0,53	0,47	0,37	0,32	0,27	0,25	0,22	0,21	0,20	0,17
17	R	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12	503,12
18	μ	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065	0,000065
19	Ср	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
20	комплекс	4,2	4,9	5,4	5,4	4,9	4,5	5,1	4	3,6	3,4	3,6	4,84	5	4,3	3,8	0,25	0,1792	0,075	0,0577	0,0392
21	Re0	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574	182667574
22	Zт	147209644	258784636	347076192	396584160	407163676	445746463	621087991	561697372	511550066	485820267	523513139	723137697	583330503	383963699	294813443	16464504	11196152	4734284	3963308	2921008
23	lg(Zт)	8,17	8,41	8,54	8,60	8,61	8,65	8,79	8,75	8,71	8,69	8,72	8,86	8,77	8,58	8,47	7,22	7,05	6,68	6,60	6,47
	Ψ_T	13,98	14,46	14,74	14,9	14,92	14,93	15,26	15,24	15,14	15	15,14	15,45	15,2	14,8	14,6	12,1	11,64	10,98	10,78	10,5
24	(Ψ_T)^2	195,4	209,1	217,3	222,0	222,6	222,9	232,9	232,3	229,2	225,0	229,2	238,7	231,0	219,0	213,2	146,4	135,5	120,6	116,2	110,3
25	b.г	1,795	1,774	1,755	1,762	1,788	1,821	1,867	1,923	1,940	1,967	1,940	1,864	1,733	1,652	1,580	1,543	1,500	1,474	1,460	1,419
26	Т.10-Т.г.ст	1105	1135	1160	1150	1115	1070	1005	925	900	860	900	1010	1190	1295	1385	1430	1480	1510	1525	1570
27	(b.г)^2	3,22	3,15	3,08	3,11	3,20	3,32	3,49	3,70	3,76	3,87	3,76	3,47	3,00	2,73	2,50	2,38	2,25	2,17	2,13	2,01

Продолжение таблицы 13.

28	q(k)	15686570	15435893	15503736	14915471	15326852	18074456	22048105	26675261	30833704	32549541	35931373	29493748	20618062	11421801	6469649	4238631	2388943	1624036	1386807	1364055
29	q(л)	6891111	6928761	6928761	6928761	6737302	6549838	6366314	6186674	6010863	5838826	5677910	5376145	5086003	4807766	4285692	3583768	2786425	1849369	1079617	581791
	q.л.пр	1884932	1890655	1890655	1890655	1838411	1787258	1737180	1688161	1640187	1593243	1549334	1466992	1387820	1311898	1169439	977905	760333	504638	294596	158754
30	q(Σ)	17571502	17326548	17394391	16806125	17165264	19861714	23785285	28363422	32473892	34142784	37480708	30960739	22005882	12733699	7639088	5216536	3149277	2128674	1681402	1522808
31	D'	0,325	0,325	0,325	0,325	0,311	0,279	0,237	0,202	0,182	0,170	0,165	0,190	0,243	0,320	0,442	0,613	0,869	1,168	1,405	1,598
32	q(ср)	17449025	17360470	17100258	16985695	18513489	21823499	26074353	30418657	33308338	35811746	34220724	26483311	17369791	10186394	6427812	4182906	2638975	1905038	1602105	761404
33	Δj	0	0,155	0,100	0,080	0,060	0,050	0,040	0,030	0,020	0,020	0,020	0,020	0,040	0,060	0,100	0,150	0,250	0,350	0,350	0,380
34	ΔF	0	0,155	0,100	0,078	0,054	0,040	0,027	0,018	0,011	0,010	0,011	0,013	0,035	0,071	0,164	0,346	0,795	1,408	1,644	0,950
35	Q	0	2696713	1713737	1331709	1007482	862905	699949	533673	355781	363837	369175	350272	600913	719651	1053400	1448797	2098249	2682269	2634489	723540
36	Ср.ж.ср	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376	2376
	m.гор	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697
37	ΔT	0	18,10	11,50	8,94	6,76	5,79	4,70	3,58	2,39	2,44	2,48	2,35	4,03	4,83	7,07	9,73	14,09	18,01	17,68	4,86
	T-ж вых	442	442	424	413	404	397	391	387	383	381	378	376	373	369	364	357	348	334	316	298
	T-ж вх	442	424	413	404	397	391	387	383	381	378	376	373	369	364	357	348	334	316	298	293
38	T.ж	442	433	418	408	400	394	389	385	382	379	377	374	371	367	361	352	341	325	307	295
		169	160	145	135	127	121	116	112	109	106	104	101	98	94	88	79	67	51	34	22
39	ZΨг	229,500	227,250	225,000	222,750	220,500	220,500	218,250	216,000	216,000	213,750	213,750	211,500	209,250	207,000	204,750	200,250	193,500	183,600	170,550	159,750
40	dэ	0,00292	0,00292	0,00292	0,00292	0,00341	0,00336	0,00370	0,00441	0,00439	0,00491	0,00499	0,00438	0,00426	0,00437	0,00398	0,00369	0,00276	0,00272	0,00271	0,00267
41	Fж	0,00348	0,00348	0,00348	0,00348	0,00416	0,00370	0,00376	0,00433	0,00390	0,00458	0,00448	0,00406	0,00511	0,00676	0,00807	0,00963	0,00895	0,01192	0,01429	0,01612
42	ож	39277	38892	38507	38122	31714	34932	33501	28598	31121	26491	26848	29524	24422	19228	16820	14503	15731	11914	9575	8169
43	λ.г	291	291	291	291	291	291	291	291	291	291	291	291	291	291	291	291	291	291	291	291
44	δ.г	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
45	m	519,564	16,349	16,268	16,187	14,764	15,495	15,174	14,020	14,625	13,493	13,584	14,245	12,956	11,496	10,752	9,984	10,398	9,049	8,112	7,493
46	np	2,784	3,551	3,551	3,551	3,881	3,962	4,401	5,035	5,058	5,771	5,668	5,079	5,229	5,085	4,849	4,417	3,825	3,902	3,921	3,988
47	ож p	109328	138115	136749	135382	123086	138395	147439	143985	157408	152879	152184	149965	127714	97778	81561	64058	60171	46491	37546	32577
48	T.ст.ж-T.ж	160	126	125	125	150	158	177	211	212	234	225	177	136	104	79	65	44	41	43	23
49	T.ж.ст	602	559	544	534	551	552	566	596	593	614	602	551	507	471	440	418	384	366	349	319
50	T.ст.ср	580	551	539	542	551	559	581	595	603	608	576	529	489	455	429	401	375	357	334	520
51	λ.ст	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270
52	ΔT	194	193	190	189	206	242	290	338	370	398	380	294	193	113	71	46	29	21	18	8
53	T.г.ст	796	752	734	722	757	794	855	934	963	1012	982	845	700	584	511	464	414	387	367	327

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица 14. Гидравлический расчет камеры РД

Наименование параметра	Формула	Сечения																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Абсцисса сечения	x	0	0,155	0,255	0,335	0,395	0,445	0,485	0,515	0,535	0,555	0,575	0,595	0,635	0,695	0,795	0,945	1,195	1,545	1,895	2,275
Внутренний диаметр	D	0,319	0,319	0,319	0,319	0,3049	0,2725	0,23094	0,1963	0,176	0,164	0,159	0,184	0,237	0,3136	0,436	0,6073	0,8627	1,162	1,399	1,592
Высота зазора	h	0,003	0,003	0,003	0,003	0,0035	0,0035	0,004	0,005	0,005	0,006	0,006	0,005	0,005	0,005	0,0045	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003
Толщина огневой стенки	$\delta_{ст}$	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Средний диаметр	D _{ср}	0,328	0,328	0,328	0,328	0,314	0,282	0,241	0,207	0,187	0,176	0,171	0,195	0,248	0,325	0,447	0,617	0,872	1,171	1,408	1,601
Шаг гофра	a	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005
Число гофров	n	160	160	160	160	155	145	130	110	100	95	90	105	140	175	250	335	500	700	850	1000
Толщина гофра	δ_r	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Линейный размер	e	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004
Ордината сечения	y	0,164	0,164	0,164	0,164	0,157	0,141	0,120	0,104	0,094	0,088	0,086	0,098	0,124	0,162	0,223	0,309	0,436	0,586	0,704	0,801
Приращение абсциссы	Δx	0,000	0,155	0,100	0,080	0,060	0,050	0,040	0,030	0,020	0,020	0,020	0,020	0,040	0,060	0,100	0,150	0,250	0,350	0,350	0,380
Приращение ординаты	Δy	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,016	0,021	0,017	0,010	0,005	0,002	0,012	0,027	0,038	0,061	0,085	0,127	0,150	0,119	0,097
Длина участка по образ.	Δl	0,000	0,155	0,100	0,080	0,060	0,053	0,045	0,034	0,022	0,021	0,020	0,023	0,048	0,071	0,117	0,173	0,280	0,381	0,370	0,392
Высота проход. сечения	h _л	0,002	0,002	0,002	0,002	0,0025	0,0025	0,003	0,004	0,004	0,005	0,005	0,004	0,004	0,004	0,0035	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002
Площадь сечения	F _ж	0,0034818	0,0034818	0,0034818	0,0034818	0,0041636	0,0037047	0,0037616	0,00433	0,0038998	0,0045792	0,0044845	0,0040609	0,0051129	0,0067581	0,0080691	0,0096259	0,0089541	0,0119153	0,0142935	0,0161188
Смачиваемый периметр	σ	0,0128806	0,0128806	0,0128806	0,0128806	0,0132448	0,0127197	0,0126452	0,013841	0,0137496	0,0146405	0,0149655	0,0136688	0,0131302	0,0136544	0,0127218	0,012578	0,0109541	0,0105109	0,0104079	0,0100594
Эквивалентный диаметр	d _э	0,0022	0,0022	0,0022	0,0022	0,0021	0,0019	0,0016	0,0013	0,0011	0,0010	0,0011	0,0012	0,0017	0,0021	0,0024	0,0026	0,0027	0,0028	0,0028	0,0028
Массовый расход	m _{охл}	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697	62,697
Температура жидкости	T _ж	442	433	418	408	400	394	389	385	382	379	377	374	371	367	361	352	341	325	307	295
		169	160	145	135	127	121	116	112	109	106	104	101	98	94	88	79	67	51	34	22
Плотность жидкости	$\rho_{ж}$	703	711	723	731	737	741	745	749	751	753	754	756	759	762	766	773	781	791	803	809
Скорость жидкости	w _ж	26	25	25	25	20	23	22	19	21	18	19	20	16	12	10	8	9	7	5	5
Вязкость жидкости	μ	0,0003796	0,0004	0,0004369	0,0004658	0,0004922	0,0005142	0,0005274	0,0005406	0,000551	0,0005629	0,0005688	0,0005807	0,0005926	0,0006164	0,0006462	0,000706	0,0007984	0,0009684	0,001244	0,001449
Число Рейнольдса	Re	24877	22091	18051	15568	11214	10278	7974	5329	4842	3566	3883	4411	4642	3975	3253	2435	2035	974	414	207
Логарифм	lg(Re)	4,396	4,344	4,256	4,192	4,050	4,012	3,902	3,727	3,685	3,552	3,589	3,645	3,667	3,599	3,512	3,386	3,309	2,989	2,617	2,316
Вычисление	d _э /0,012	0,182	0,182	0,182	0,182	0,177	0,159	0,135	0,111	0,096	0,087	0,096	0,103	0,145	0,179	0,197	0,214	0,224	0,230	0,234	0,234
	λ_0	0,0252	0,0260	0,0273	0,0283	0,0307	0,0314	0,0335	0,0370	0,0379	0,0409	0,0401	0,0388	0,0383	0,0398	0,0419	0,0450	0,0471	0,0566	0,0701	0,0834
	Ψ_t	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	ω	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,905	0,91	0,94	0,94	0,91	0,91	0,905	0,905	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Коэффициент трения	λ	0,057	0,058	0,061	0,064	0,069	0,071	0,075	0,084	0,086	0,096	0,094	0,088	0,087	0,090	0,095	0,101	0,106	0,127	0,158	0,188
Отн. гидравл. пот.	A	6001118	6111577	6321406	6487867	5012401	7138862	8644148	8777625	12928597	11529370	10626071	11239317	4983505	2371452	1579967	1082504	1237768	807400	673090	626186
Их среднее значение	A _{ср}	6056347	6216491	6404636	5750134	6075631	7891505	8710886	10853111	12228983	11077720	10932694	8111411	3677479	1975709	1331235	1160136	1022584	740245	649638	313093
Потери на трение	$\Delta p_{тр}$	0	963556	640464	460011	366872	414769	391649	373276	274274	229779	220099	188373	176452	140635	155902	200247	286834	281775	240052	122752
Коэф. местн. сопротивл.	ξ_m	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5
Потери от местн. сопр	Δp_m	0	0	0	0	0	96594	0	0	0	0	90709	0	0	0	0	0	0	0	0	14026
Изменение динам напора	Δp_d	2628	3785	2454	67976	-39370	6788	46477	-32068	47480	-5074	-28005	58481	42619	17103	11936	-3932	13891	5507	2636	9351
Потери давления	$\Delta p_{охл}$	2628	967341	642918	527987	327502	518150	438126	341209	321754	224705	282803	246854	219071	157738	167838	196315	300725	287281	242687	146129
	$\Sigma \Delta p_{охл}$	6559759																			

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Таблица 15. Расчет общей несущей способности оболочек камеры

Точки		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$\varepsilon_{\text{.уп}}$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
2	$\varepsilon_{\text{.хп}}$	0	0,0016	0,0016	0,0015	0,002	0,0025	0,0024	0,0028	0,0032	0,0036
3	$\varepsilon_{\text{'.x}}$	-0,0065	-0,0049	-0,0049	-0,0050	-0,0045	-0,0040	-0,0041	-0,0037	-0,0033	-0,0029
	$\varepsilon_{\text{'''.x}}$	-0,0011	0,0005	0,0005	0,0004	0,0009	0,0014	0,0013	0,0017	0,0021	0,0025
	$\varepsilon_{\text{'.y}}$	-0,0065	0,0035	0,0135	0,0235	0,0335	0,0435	0,0535	0,0635	0,0735	0,0835
	$\varepsilon_{\text{'''.y}}$	-0,0011	0,0089	0,0189	0,0289	0,0389	0,0489	0,0589	0,0689	0,0789	0,0889
	$t_{\text{'}}$	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362
	$t_{\text{''}}$	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
	$\alpha_{\text{'}}$	0,000018	0,000018	0,000018	0,000018	0,000018	0,000018	0,000018	0,000018	0,000018	0,000018
	$\alpha_{\text{''}}$	0,000019	0,000019	0,000019	0,000019	0,000019	0,000019	0,000019	0,000019	0,000019	0,000019
4	$\varepsilon_{\text{'.i}}$	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$\varepsilon_{\text{'''.i}}$	0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
	$\sigma_{\text{'.i}}$	102000000	1,02E+08	1,02E+08	1,65E+08	1,73E+08	2,67E+08	2,93E+08	3,2E+08	3,33E+08	3,53E+08
	$\sigma_{\text{'''.i}}$	0	6,93E+08	6,67E+08	8,8E+08	9,73E+08	9,87E+08	9,93E+08	1E+09	1E+09	1E+09
5	$\sigma_{\text{'.x}}$	-1,02E+08	-8,5E+07	18142193	59783662	77582704	1,31E+08	1,48E+08	1,68E+08	1,79E+08	1,93E+08
	$\sigma_{\text{'''.x}}$	0	4,35E+08	4,01E+08	5,2E+08	5,82E+08	5,94E+08	5,93E+08	5,99E+08	6E+08	6,02E+08
	$\sigma_{\text{'.y}}$	-1,02E+08	27418205	1,1E+08	1,87E+08	1,98E+08	3,07E+08	3,38E+08	3,69E+08	3,84E+08	4,07E+08
	$\sigma_{\text{'''.y}}$	0	7,99E+08	7,7E+08	1,02E+09	1,12E+09	1,14E+09	1,15E+09	1,15E+09	1,15E+09	1,15E+09
6	k	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	правая ч.	-204000	2452348	2529574	3421264	3766271	4032436	4114231	4201293	4231586	4277902
	левая ч.	-408000	2267152	2480190	3356590	3801002	4091963	4149240	4264094	4317375	4380764
	р.г.	-1275000	15327178	15809837	21382898	23539196	25202727	25713941	26258084	26447412	26736887
	р.г.раб	21049472	21049472	21049472	21049472	21049472	21049472	21049472	21049472	21049472	21049472
	n										1,270193