

Проектирование камеры
ЖРД
первой ступени ракеты
тягой 1,78 МН
на топливе
керосин и кислород

Цели и задачи

- Осуществить модифицирование исходного ЖРД НК-33, увеличением его тяги на 18% при сохранении давления в камере сгорания, как в исходном двигателе НК-33.
- 1) Проведение термодинамического расчёта камеры
- 2) Проведение расчёта смесеобразования в камере (традиционным способом и с помощью CFD-моделирования)
- 3) Проведение расчёта охлаждения
- 4) Проведение прочностного расчёта
- 5) Формирование конструкции камеры в виде чертежа

Формирование целевой функции

Коэффициент избытка окислителя $\alpha_{ок}$ в камере и соотношение компонентов K_m выбирается таким образом, чтобы **обеспечивалась максимальная эффективность ракеты**. Критерием эффективности ракеты может служить **идеальная скорость её полета в конце активного участка траектории**, рассчитываемая по уравнению К.Э. Циолковского:

$$V_{ид} = I_{у.с.} \cdot \ln \mu_k$$

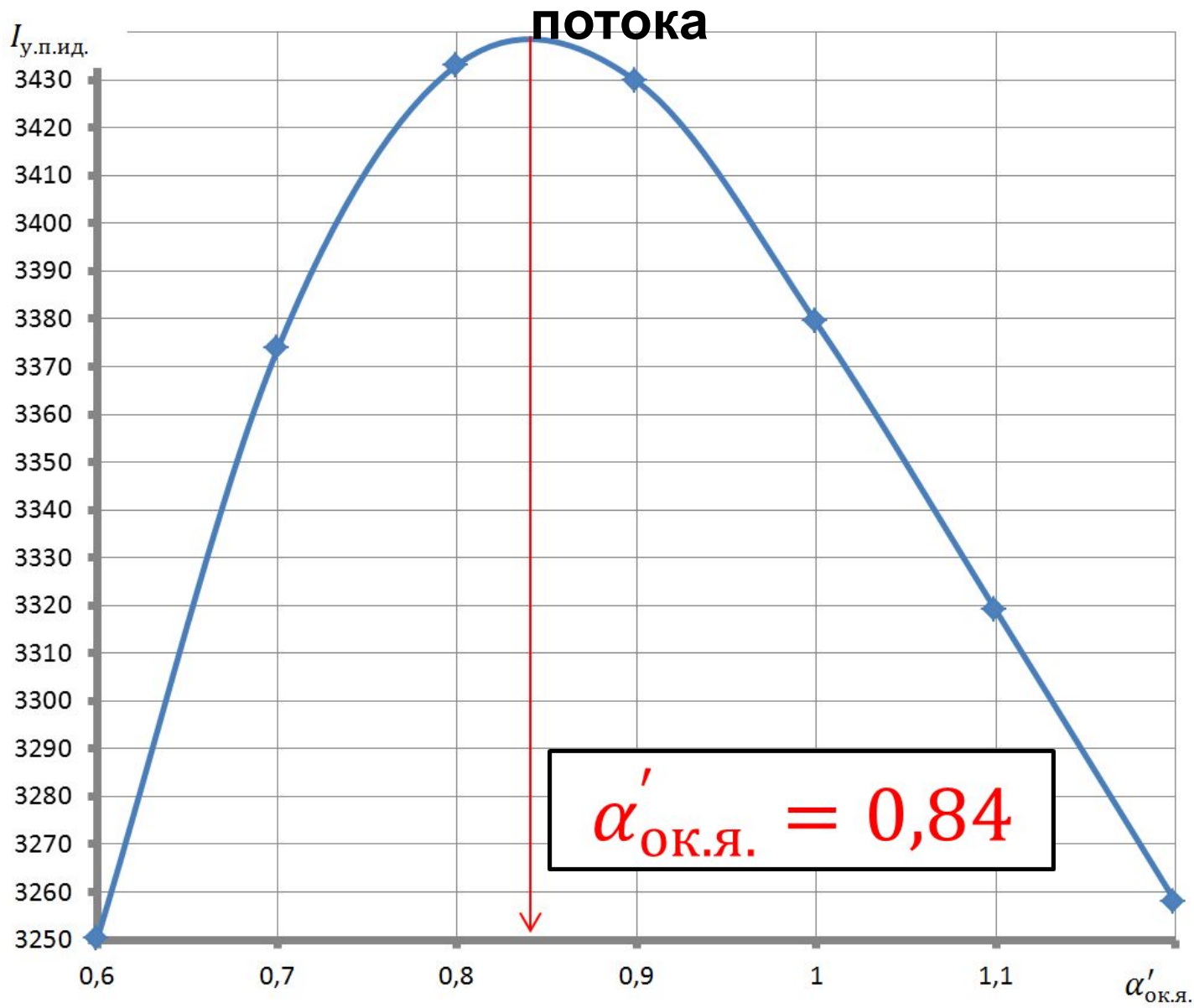
$$F = -I_y \cdot \rho_T^C,$$

$$C = \frac{\mu_k - 1}{\mu_k \cdot \ln \mu_k}$$

$$\mu_k = 2,5$$

$$F = -I_{у.п.ид.} \cdot \rho_T^{0,6548}$$

Определение значения оптимального коэффициента избытка окислителя в ядре потока



Выбирается относительный массовый расход
продуктов сгорания через пристеночный слой

$$\bar{m}_{\text{пр}} = 0,0439$$

$$\bar{m}_{\text{я}} = 1 - \bar{m}_{\text{пр}} = 0,9561$$

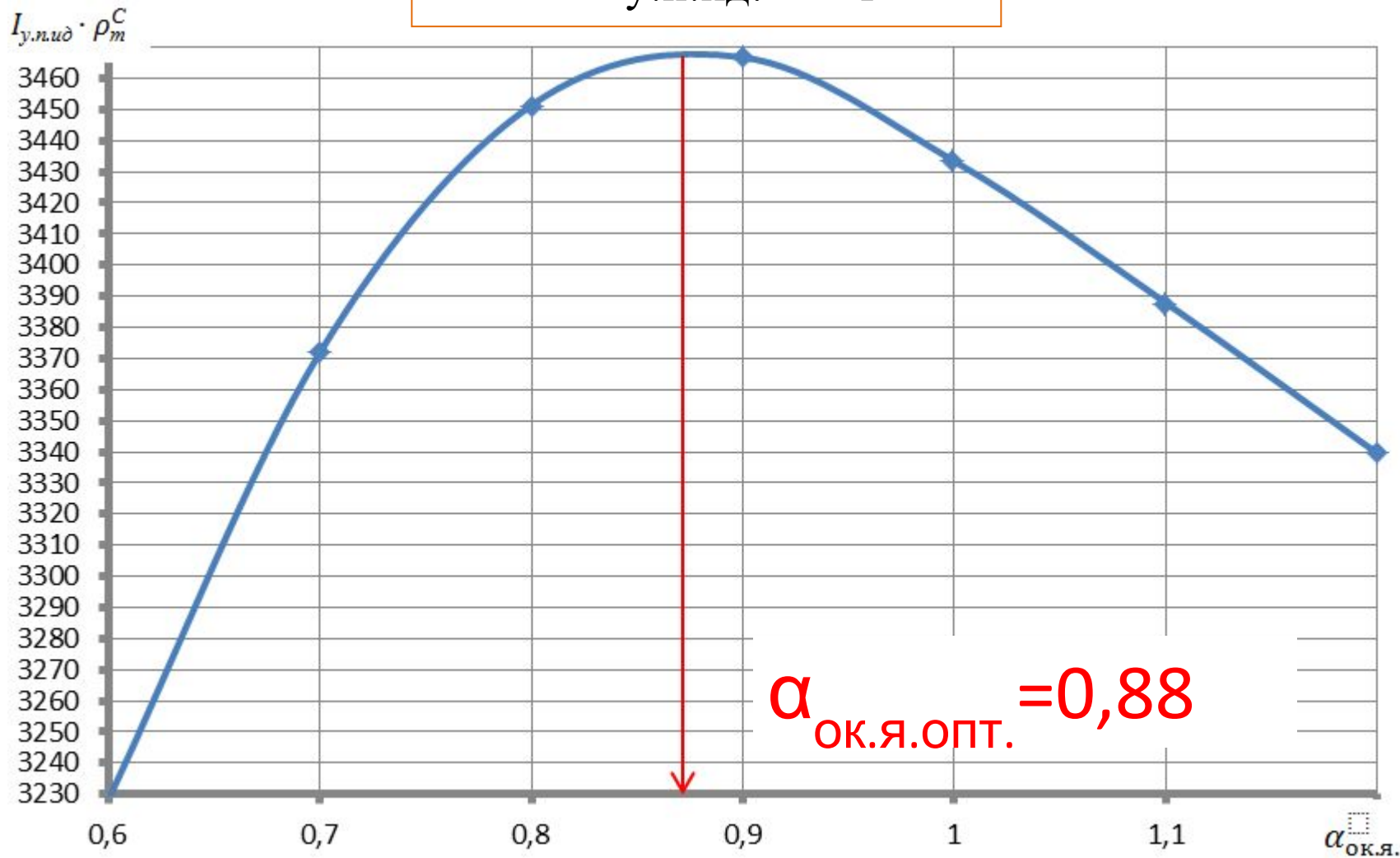
Плотность топлива в ядре потока для 6-
ти значений $\alpha_{\text{ок}}$
и плотность топлива в пристенке

Строится график
зависимости

$$F = -I_{\text{у.п.ид.}} \cdot \rho_{\text{т}}^{0,6548}$$

Графическая зависимость

$$F = -I_{\text{у.п.ид.}} \cdot \rho_{\text{T}}^{0,6548}$$



Определение значения оптимального коэффициента избытка окислителя в пристенке

С помощью СПК TERRA определяется значение коэффициента избытка окислителя в пристеночном слое $\alpha_{\text{ок.пр.}}$, которое обеспечит выбранную температуру продуктов сгорания.

$$T_{\text{ос.пр}} = 2100 \text{ К}$$

$$\alpha_{\text{ок.пр.}} = 0,393$$

Для найденного значения $\alpha_{\text{ок.я.опт.}}$
по СПК TERRA производятся все
дальнейшие расчёты (приложение
В).

Среднее по камере
сгорания действительное
массовое соотношение
компонентов

$$K_{\text{т.ср.}} = 2,534$$

Средний по камере
сгорания коэффициент
избытка окислителя

$$\alpha_{\text{ок.ср.}} = 0,7436.$$

Аналогично ядру потока по известным значениям $\alpha_{\text{ок.пр}}$, $p_{\text{ос}}$ и ε определяется для пристеночного слоя идеальная геометрическая степень расширения сопла

$$\bar{F}_{\text{а.ид.пр}} = 23,77$$

Средняя для камеры идеальная геометрическая степень расширения сопла

$$\bar{F}_{\text{а.ид}} = 28,00 \cdot 0,9561 + 23,77 \cdot 0,0439 = 27,82$$

Из ТЗ
известно:

$$\bar{F}_{\text{а.ид.я.}} = 28$$

Степень расширения рабочего тела в сопле

$$\varepsilon = \frac{p_{oc}}{p_a},$$

$$\varepsilon = \frac{14,54 \cdot 10^6}{63,8 \cdot 10^3} = 228$$

Идеальная геометрическая степень расширения сопла

$$\bar{F}_{a.ид.я.} = 28,00$$

*Действительный
расходный комплекс
камеры*

$$\beta = 1736 \frac{\text{НС}}{\text{КГ}}$$

Давление в камере
в сечении К
(за форсунками)

$$p_{\text{К}} = 15,098 \text{ МПа}$$

*Действительный удельный
импульс тяги двигателя в
пустоте*

$$I_{\text{у.п.дв}} = 3216 \frac{\text{М}}{\text{С}}$$

Действительный удельный
импульс тяги двигателя на
Земле

$$I_{\text{у.з.дв}} = 2885 \frac{\text{М}}{\text{С}}$$

Массовый расход топлива через камеру

$$\dot{m} = \frac{P_u}{I_y} (1 - \bar{m}_{\Gamma\Gamma}),$$

$$\dot{m} = 612,3 \text{ кг/с}$$

Массовый расход окислителя через камеру

$$\dot{m}_{\text{ок}} = 439,1 \text{ кг/с}$$

Массовый расход горючего через камеру

$$\dot{m}_{\Gamma} = 173,3 \text{ кг/с}$$

ЖРД	Диаметр цилиндрической части камеры сгорания, м	Диаметр критического сечения сопла, м	Диаметр выходного сечения сопла, м
НК-33	0,430	0,281	1,148
НК-33-11 8			

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ТОПЛИВА

Перепад давления в тракте охлаждения
камеры
 $\Delta p_{\text{охл}} = 0,33 \cdot 15,10 = 4,983 \text{ МПа.}$

Перепад давления на регуляторе тяги $\Delta p_p = 2,565 \text{ МПа}$

Перепад давления на регуляторе соотношения
компонентов $\Delta p_{\text{э}} = 1,887 \text{ МПа}$

Падение давления в подводящих магистралях из-за гидросопротивления
трубопроводов и агрегатов: $\Delta p_m = 1,095 \text{ МПа.}$

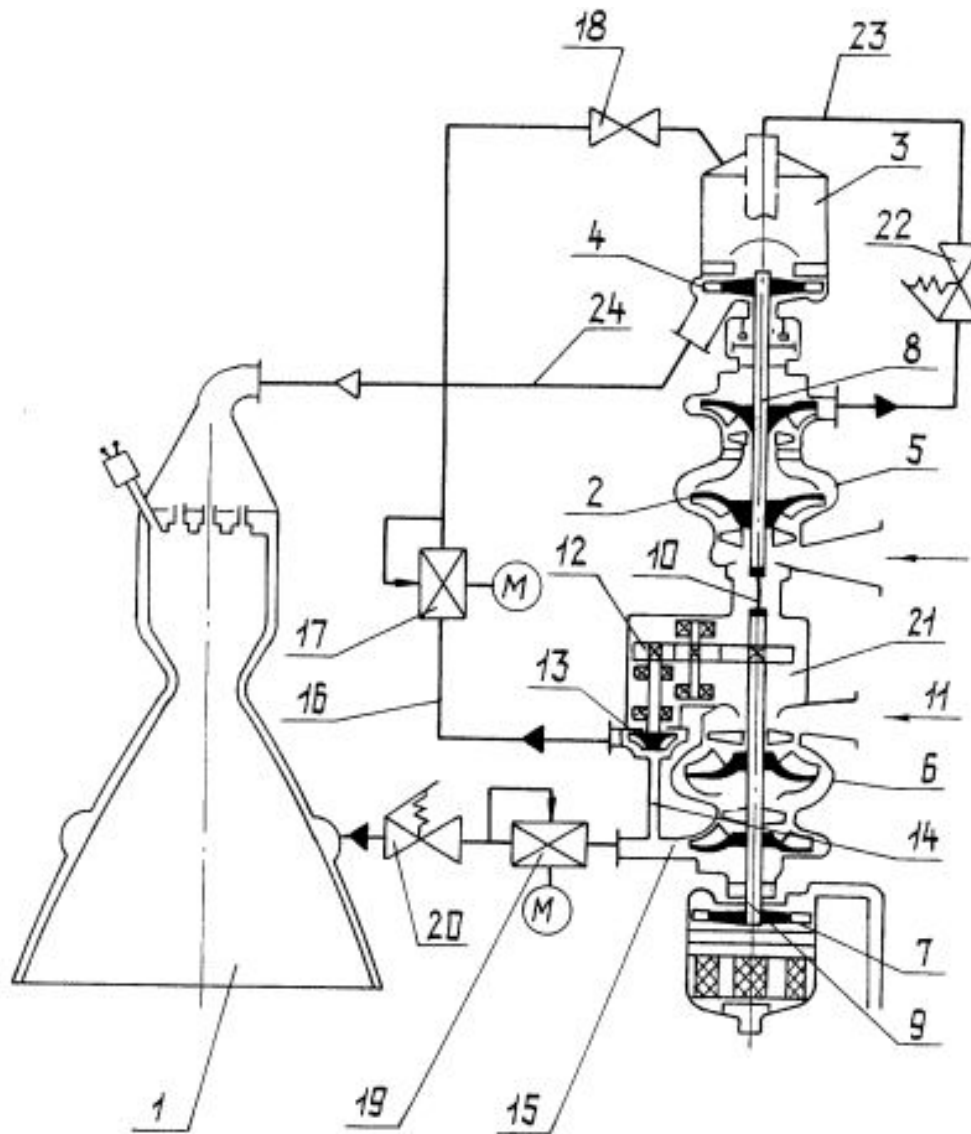
Падение давления в трубопроводе $\Delta p_{\text{тр}} = 0,1132 \text{ МПа}$

Падение давления на клапане $\Delta p_{\text{кл}} = 0,3020 \text{ МПа.}$

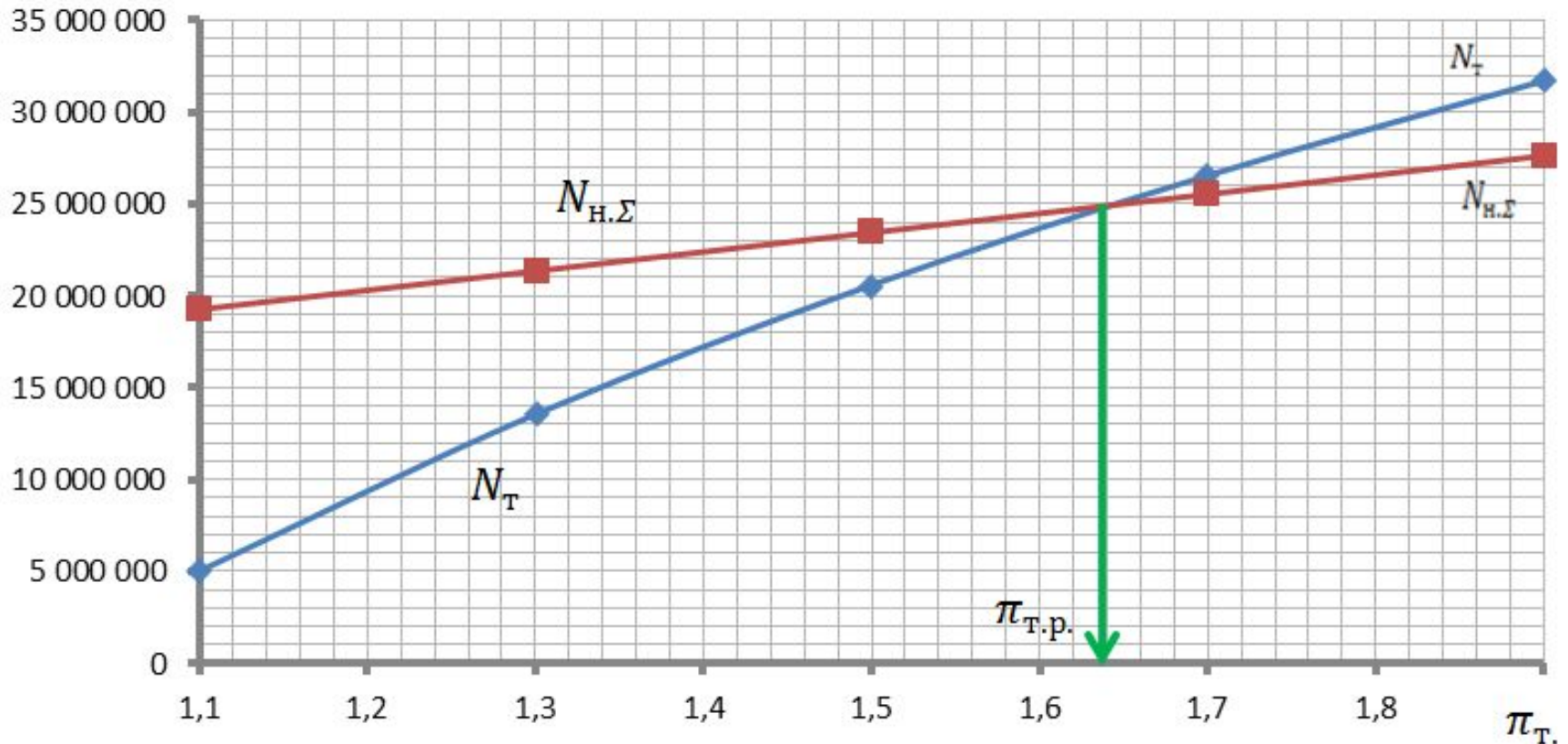
Падение давления на дроссельной диафрагме $\Delta p_d = 0,6794 \text{ МПа}$

Падение давления на участке газопровода от газогенератора до форсунок
камеры $\Delta p_{\text{гв}} = 0,7549 \text{ МПа.}$

Схема ПГС штатного ЖРД



Определение расчётной степени расширения газа в турбине ТНА



Расчётная степень расширения газа в турбине
ТНА $\pi_{T.p.} = 1,64$

1,64	Ст-нь расширения генераторного газа в турбине	определяется по графику
27 475 110	Давление в камере ГГ	Па
29 118 311	Давление на выходе из насоса окислителя	Па
23 483 090	Давление на выходе из основного насоса горючего	Па
29 118 311	Давление на выходе из насоса высокого давления	Па
5 635 221	Повышение давления в насосе высокого давления Г	Па
28 718 311	Повышение давления в основном насосе ОК	Па
23 083 090	Повышение давления в основном насосе Г	Па
17 015 482	Потребная мощность основного насоса ОК	Вт
7 691 130	Потребная мощность основного насоса Г	Вт
135 054	Потребная мощность насоса высокого давления Г	Вт
24 841 667	Суммарная потребная мощность насосов ТНА	Вт
24 849 836	Мощность турбины ТНА	Вт
603	Температура генераторного газа за турбиной	К
16 753 116	давление генераторного газа за турбиной	Па
433,3	Расход генераторного газа через ядерные форсунки камеры	кг/с
13,4232	Расход генераторного газа через пристеночные форсунки камеры	кг/с
	Расход жидкого топлива через форсунки	

Внутренний контур камеры

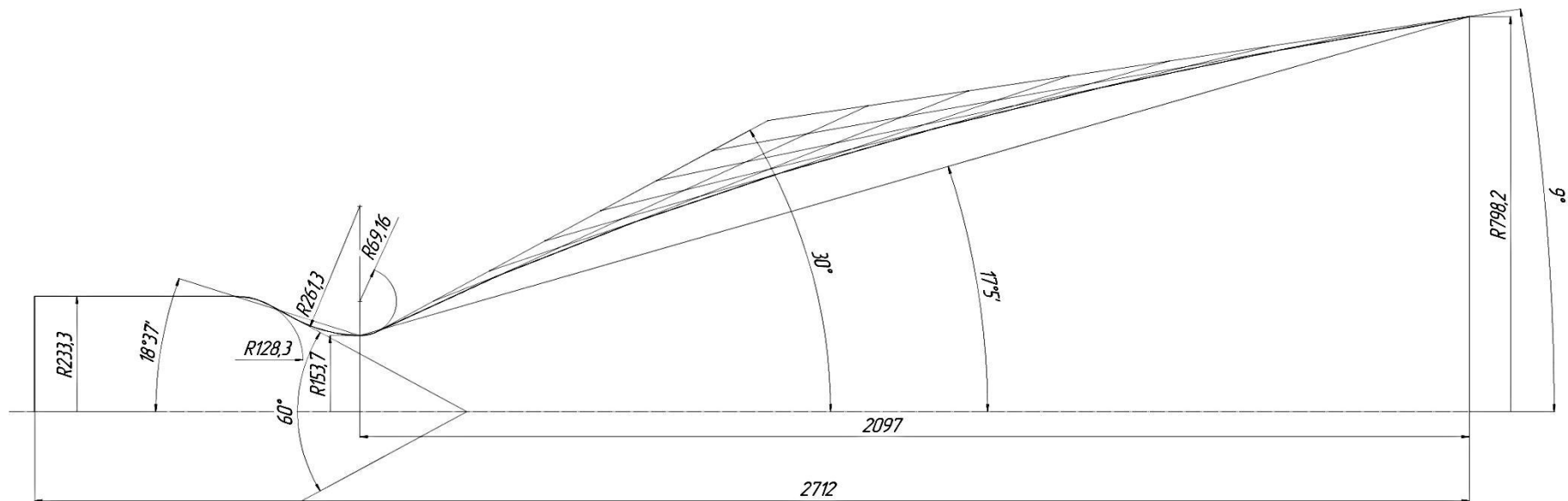
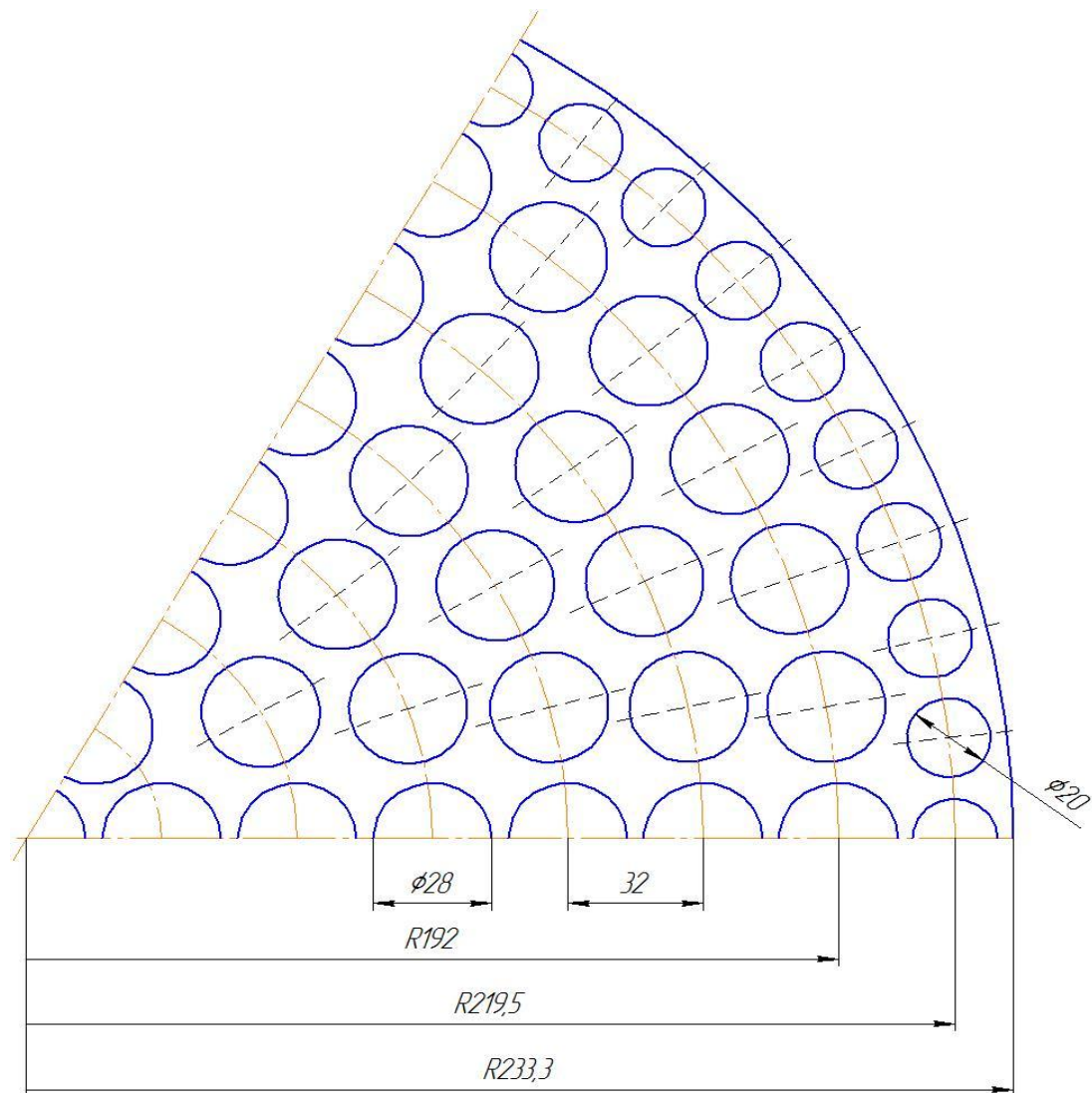
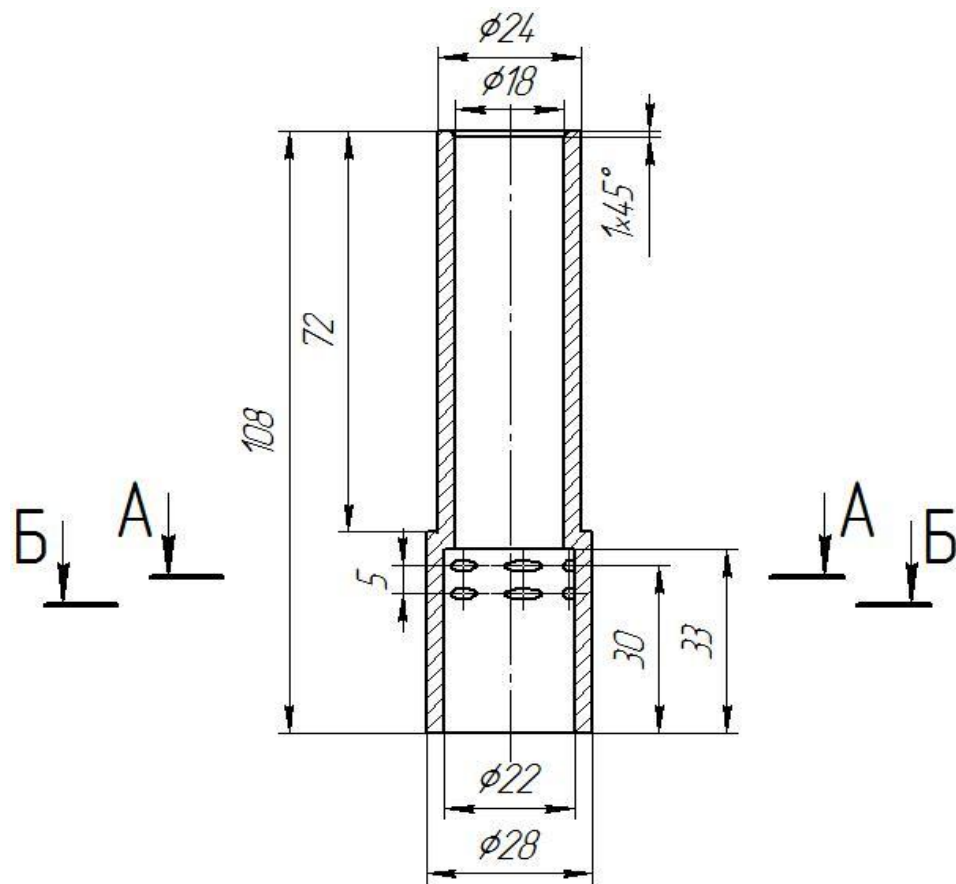
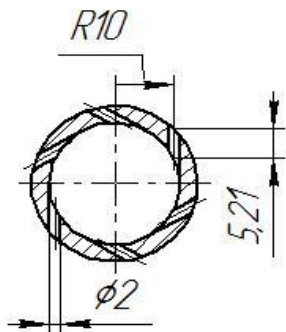


Схема расположения форсунок на смесительной головке камеры ЖРД



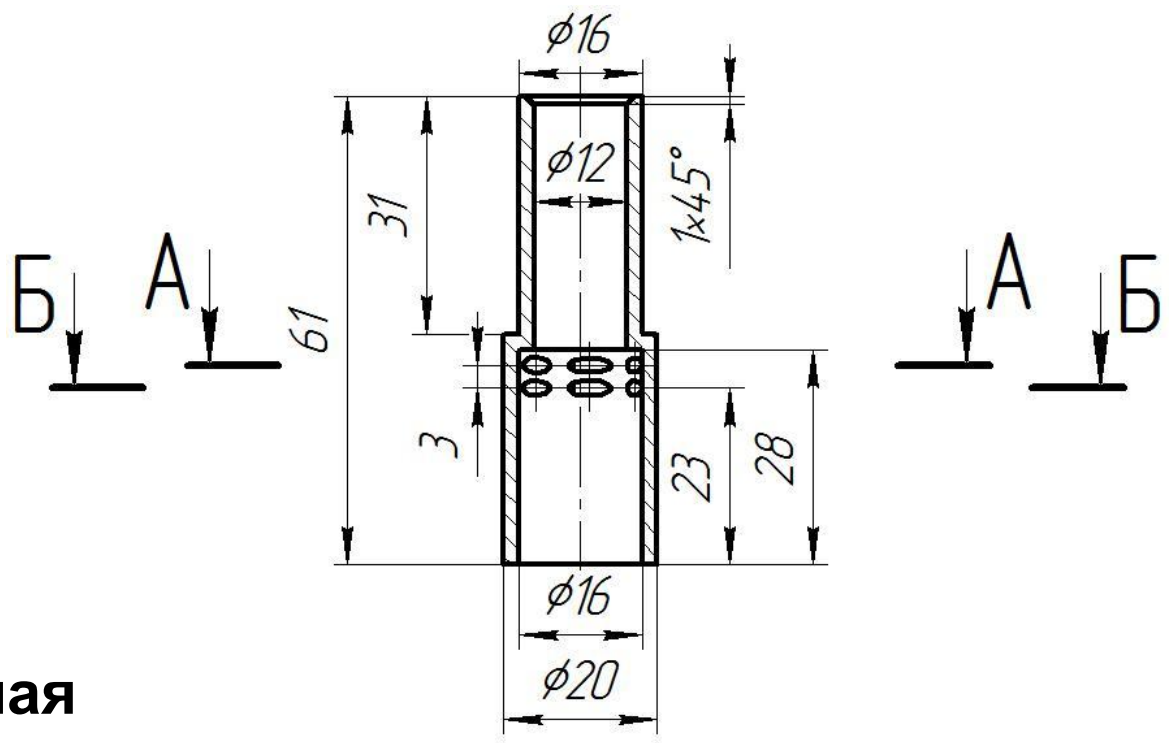


A-A, B-B

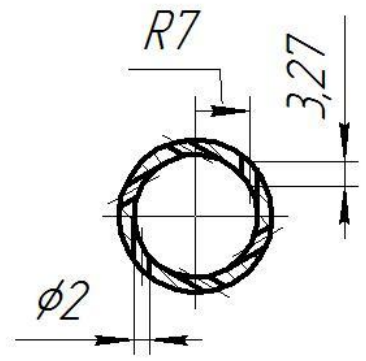


Двухкомпонентная
ядерная
струйно-центробежная
газожидкостная
форсунка
с внутренним смешением

Двухкомпонентная
пристеночная
струйно-центробежная
газожидкостная
форсунка
с внутренним смешением



A-A, B-B



РАСЧЁТ ТЕПЛОЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ КАМЕРЫ

Расчет проточного охлаждения камеры в программе OXLADA,
разработанной на кафедре КиПДЛА

Проектирование оребрения охлаждающего тракта корпуса
камеры

Расчет температуры стенки с учетом оребрения

Применено покрытие из двуокиси циркония ZrO_2 толщиной 0,25 мм.

РАСЧЁТ НА

ПРОЧНОСТЬ

- форсуночного блока днища,
- наружного днища,
- сварного шва,
- расчет общей прочности камеры.

ИССЛЕДОВАНИЕ
ДВИЖЕНИЯ
РАБОЧЕГО ТЕЛА В

ФОРСУНКАХ

С ПОМОЩЬЮ ANSYS CFD

Исходные

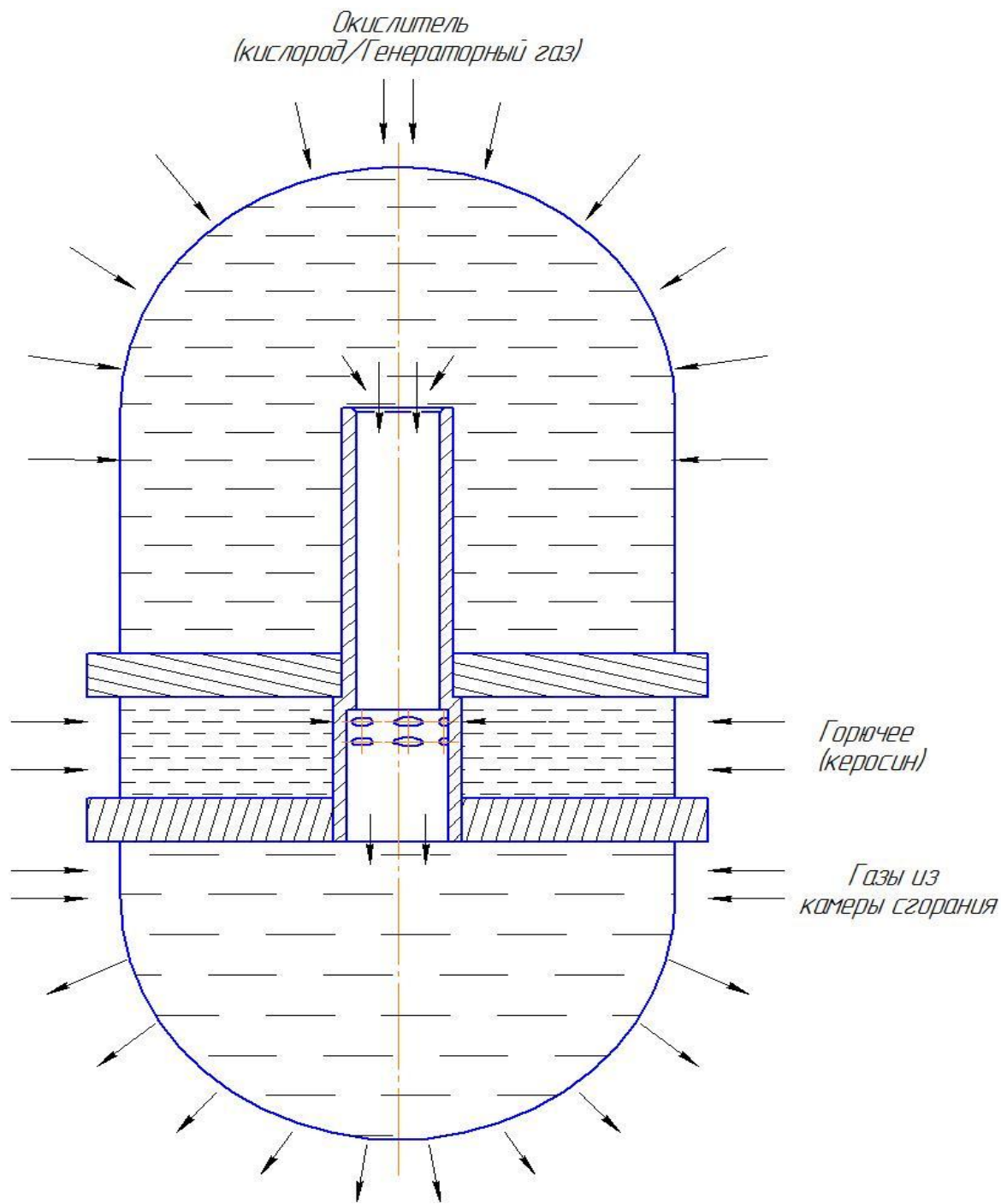
Наименование	Значение	Размерность
Расход генераторного газа	3,412	кг/с
Расход керосина	1,198	кг/с
Давление на выходе из форсунки	15,098	МПа

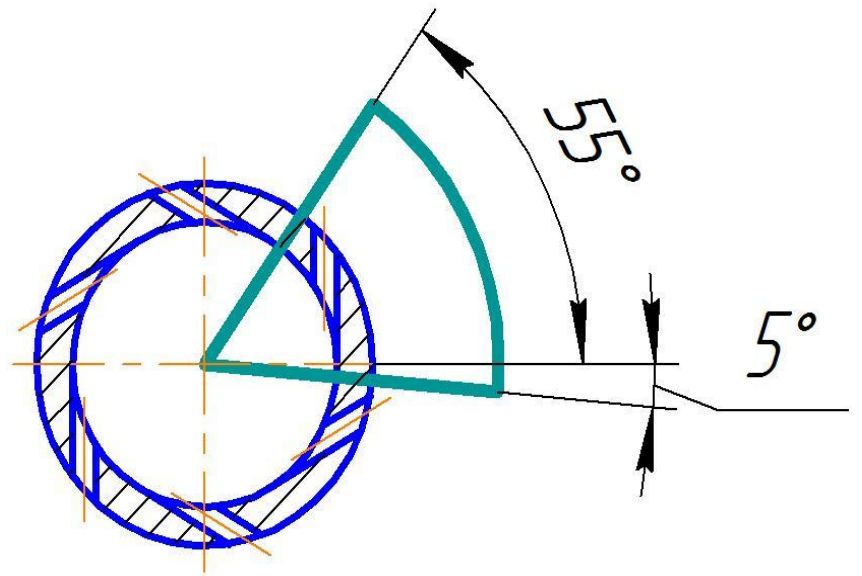
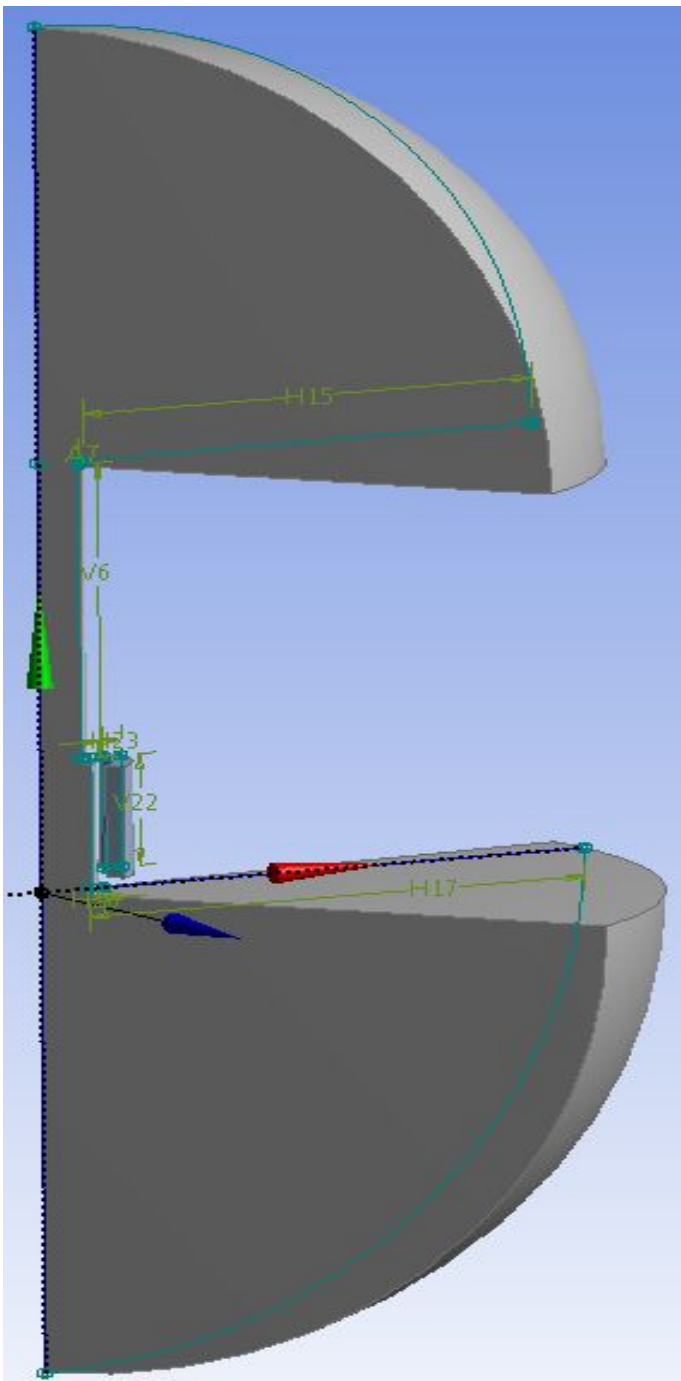
Наименование	Значение	Размерность
Расход генераторного газа	0,2486	кг/с
Расход керосина	0,2078	кг/с
Давление на выходе из форсунки	15,098	МПа

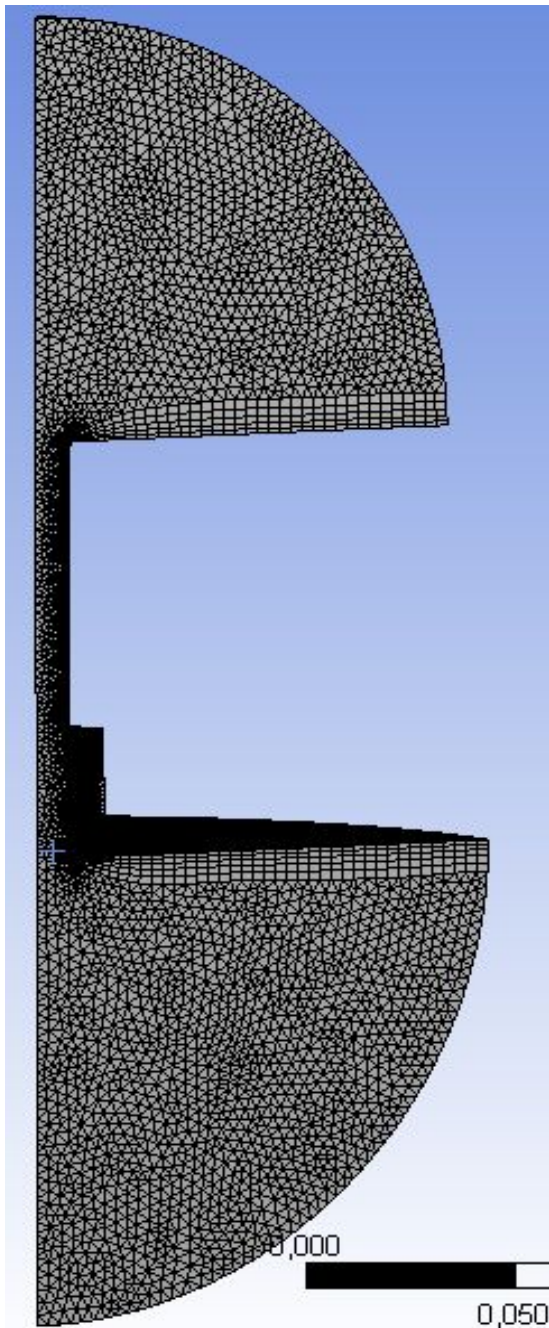
Параметр	Компонент		
	Генераторный газ	Керосин	Вода и CO ₂
Состав	Генераторный газ	Керосин	Вода и CO ₂
Фазовое состояние	Газ	Жидкость	Газ
Молярная масса, г/моль	32	142	30
Плотность *, кг/м ³	94,2	780	23,79
Динамическая вязкость, Па · с	$1,92 \cdot 10^{-5}$	$1,49 \cdot 10^{-3}$	$4,16 \cdot 10^{-6}$

* Несмотря на то, что плотность газов при изменяющемся давлении не является постоянной величиной, на первом этапе расчёта она принимается постоянной.

Создание
геометрической
модели (CAD-модели)
проточной части
форсунки



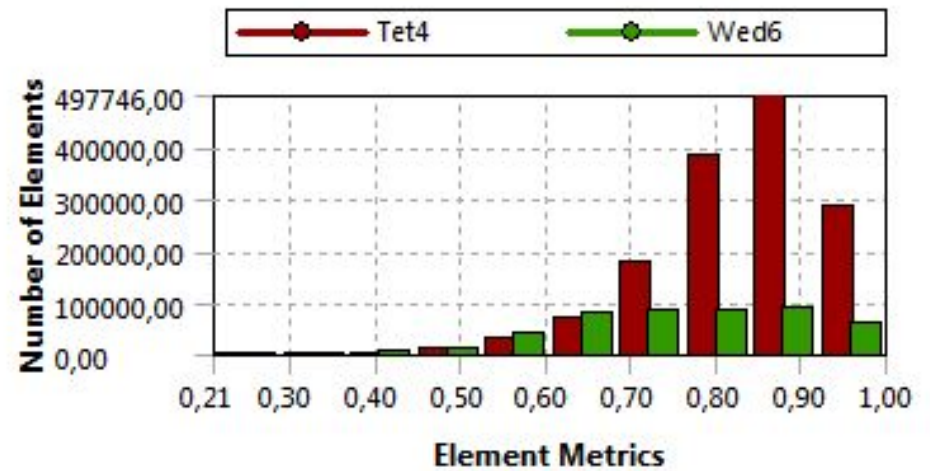




Statistics

<input type="checkbox"/> Nodes	494149
<input type="checkbox"/> Elements	1892096
Mesh Metric	Element Quality <input type="button" value="▼"/>
<input type="checkbox"/> Min	0,208882257172698
<input type="checkbox"/> Max	0,999999505991024
<input type="checkbox"/> Average	0,81888493888872
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,110053494764419

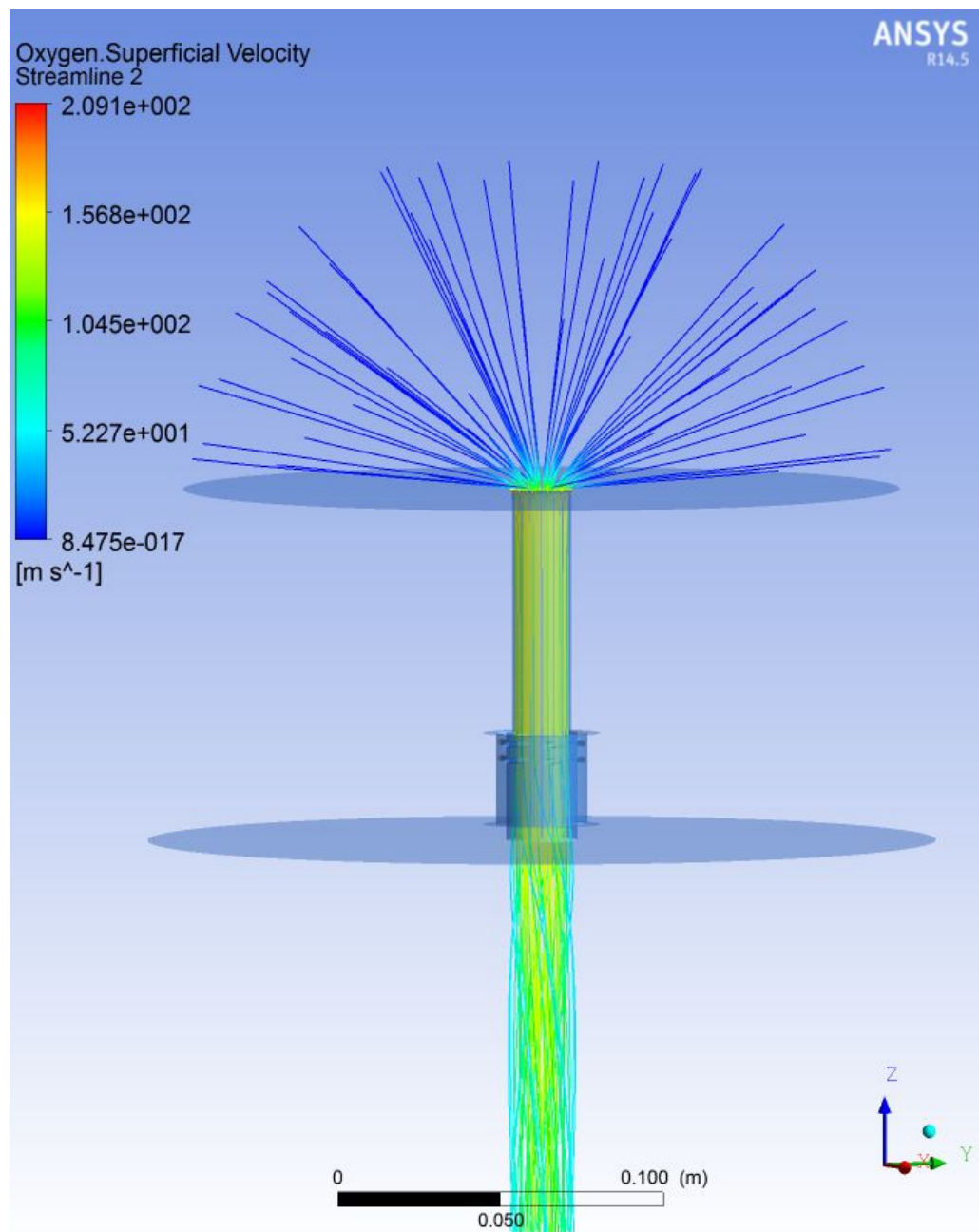
Controls



Задаются параметры
расчётной модели
форсунки
И
параметры решателя

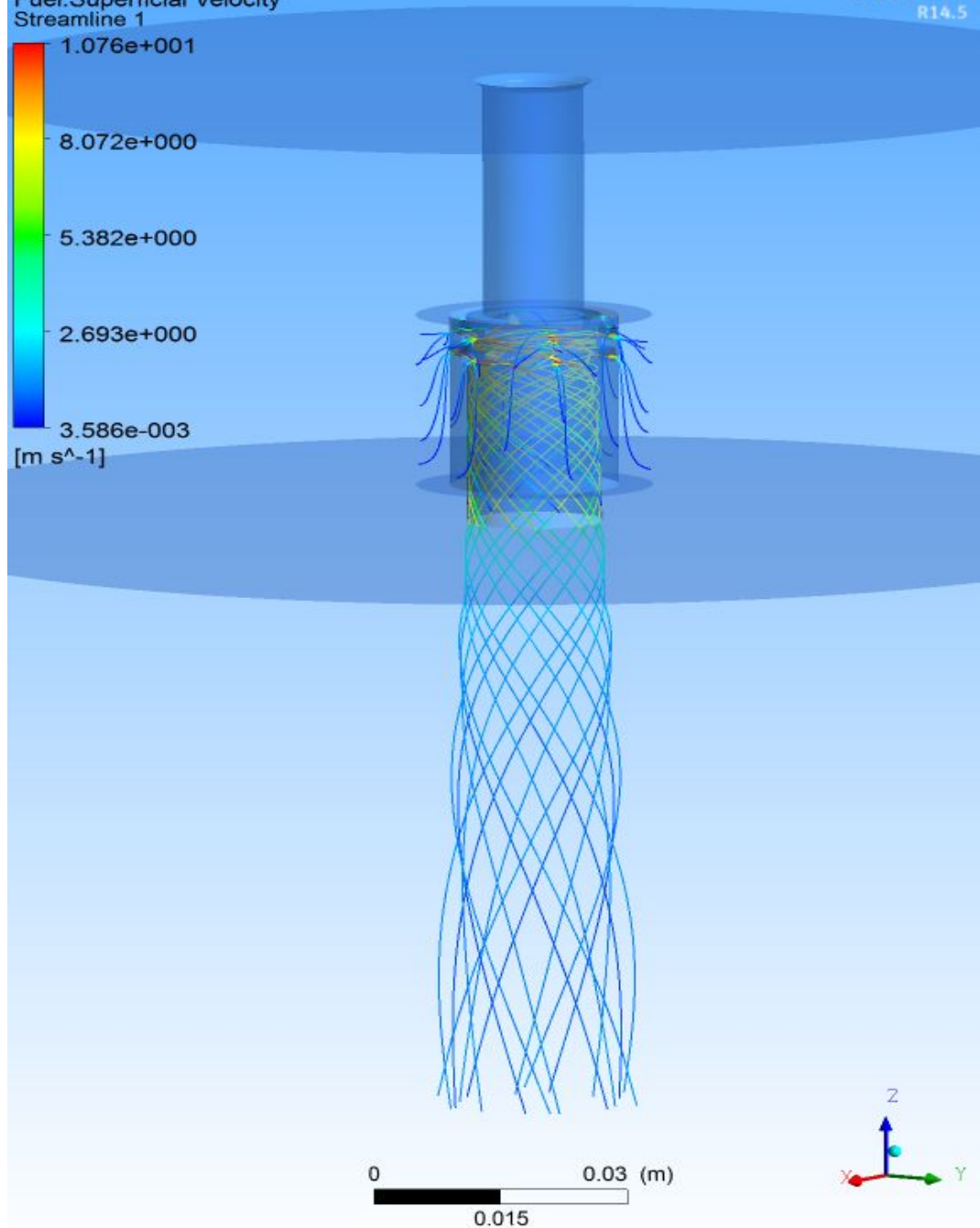
Результаты моделирования

Линии тока окислителя

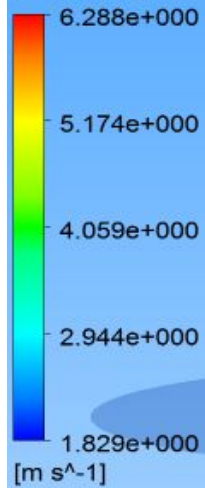


Fuel.Superficial Velocity
Streamline 1
1.076e+001
8.072e+000
5.382e+000
2.693e+000
3.586e-003
[m s⁻¹]

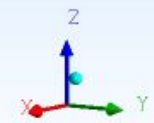
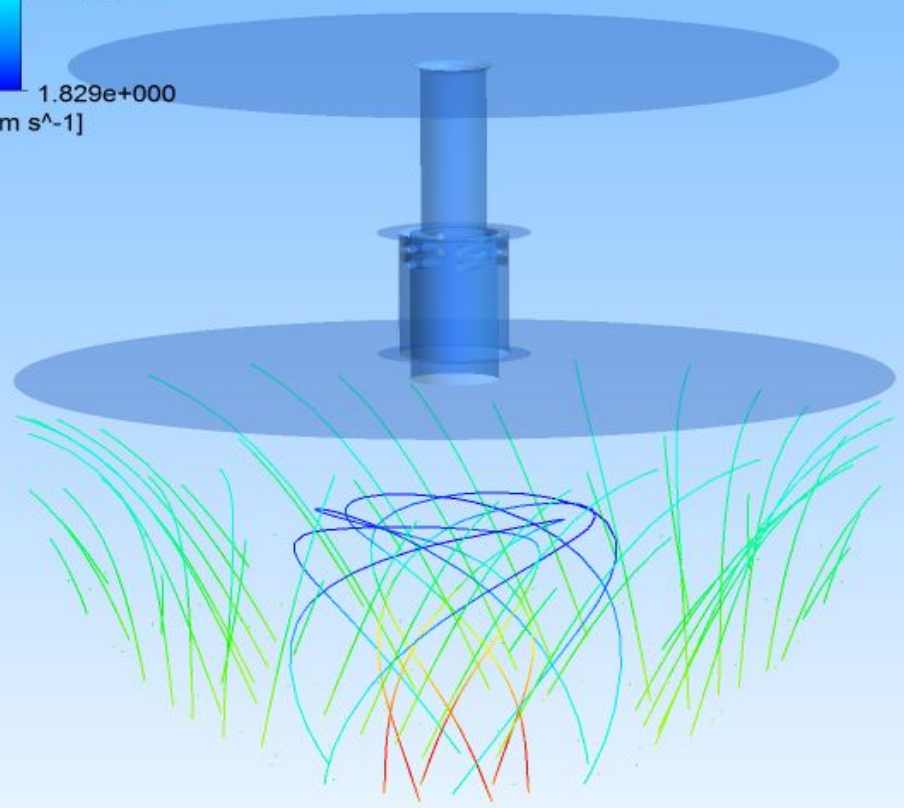
Линии тока
горючего

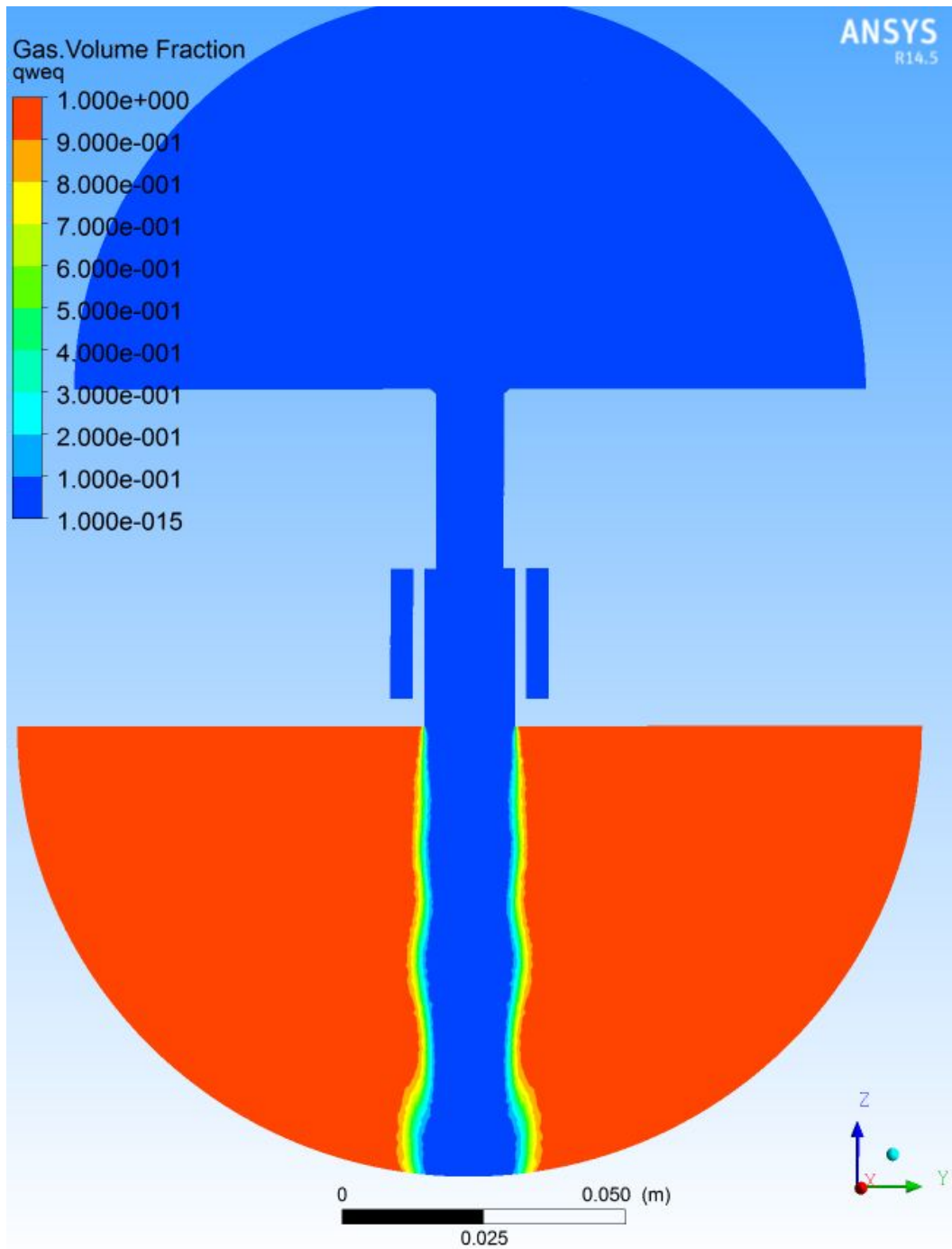


Gas.Superficial Velocity
Streamline 1



Линии тока
продуктов
сгорания





Контуры
концентрации
продуктов сгорания

Анализ первичных параметров моделирования **ядерной** форсунки

Параметр	Результат аналитический	Результат CFD-расчёта
Расход окислителя, г/с	3,412	3,412
Расход горючего, г/с	1,198	1,198
Давление на выходе из форсунки, МПа	15,098	15,098
Давление на входе окислителя, МПа	16,198	16,095
Давление на входе горючего, МПа	16,198	16,544

Анализ первичных параметров моделирования **пристеночной** форсунки

Параметр	Результат аналитический	Результат CFD-расчёта
Расход окислителя, г/с	0,2486	0,2486
Расход горючего, г/с	0,2078	0,2078
Давление на выходе из форсунки, МПа	15,098	15,098
Давление на входе окислителя, МПа	16,198	15,129
Давление на входе горючего, МПа	16,198	15,154

- ***ошибки округления,***

связанные с тем, что числа в памяти компьютера представляются с конечной точностью;

- ***ошибки сходимости или ошибки недостаточного количества итераций,***

связанные с тем, что поставленная система уравнений, правильно описывающая задачу, была сведена не достаточно точно при ограниченном количестве расчётных итераций;

- ***ошибки дискретизации,***

связанные с конечной точностью представления гладких функций на расчётной сетке с конечным размером элементов;

- ***ошибки применяемых при расчёте моделей***

(многофазности, турбулентности и т.п.);

- ***системные ошибки,***

вызванные некорректной постановкой моделирования (например, решение задачи, имеющей несимметрию процесса в симметричной постановке);

- ***ошибки пользователя.***

Экономические

аспекты

Затраты на промышленное
производство ЖРД

$$C_{\text{ст}} = 1750 \text{ млн. руб.}$$

Затраты
НИОКР

$$C_{\text{ниокр}} = 4360 \text{ млн. руб.}$$

Суммарная стоимость ступени с
ЖРД

$$C_{\text{ст}} = 443,7 \cdot 2 + 634,5 = 1522 \text{ млн. руб.}$$

Расчет стоимости проектируемого двигателя с
помощью компьютерного моделирования

4,688 млн.
руб.

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Экологическая экспертиза проекта ЖРД

- Определение концентрации вредных веществ
(приложение В)
- Оценка акустического воздействия
- Оценка воздействия на озоновый слой

В данном дипломном проекте был проведён термогазодинамический расчёт модифицированного по тяге ЖРД НК-33, были определены основные параметры двигателя, также проведён расчёт смесеобразования и спроектирована смесительная головка с двумя типами форсунок.

Данный двигатель был спроектирован на основе ЖРД НК-33 и представляет собой возможное продолжение серии ракетных двигателей (НК-33 и НК-43), получивших мировое признание, как самые надёжные ЖРД.