



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет  
имени Н. Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н. Э. Баумана)

---

ФАКУЛЬТЕТ \_\_\_\_\_ «СПЕЦИАЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

КАФЕДРА \_\_\_\_\_ «РАКЕТНЫЕ И ИМПУЛЬСНЫЕ СИСТЕМЫ» (СМ-6)

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА**

ПО ДИСЦИПЛИНЕ:

«Проектирование энергетических установок ракетного оружия»

---

НА ТЕМУ:

«Профилирование сопла и расчет тепловых потоков по его тракту»

---

Выполнили студенты  
группы:

СМ6-82

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Н. К. Широкопетлев  
(И.О. Фамилия)

Проверил:

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

А. А. Федоров  
(И.О. Фамилия)

Москва, 2022 г.

## Оглавление

Введение .....	3
1. Формирование исходных данных .....	4
1. Профилирование сопла .....	10
2. Расчет параметров по тракту сопла .....	13
3. Определение потерь удельного импульса.....	21
Выводы .....	26
Список литературы.....	28

## Введение

Сопло ракетного двигателя предназначено для создания тяги путем превращения тепловой энергии, выделяющейся при сгорании топлива, в кинетическую энергию продуктов сгорания.

Основной частью соплового блока является непосредственно сопло, представляющее собой газовый тракт переменного сечения, сужающийся до минимального – критического – сечения, в котором скорость продуктов сгорания достигает скорости звука. В сужающейся части поток газов имеет дозвуковую скорость, а за критическим сечением ускоряется до получения расчетной сверхзвуковой скорости в выходном сечении. При этом на стенки сопла действуют высокая температура продуктов сгорания, их химические компоненты, большие скорости движения и плотность газового потока. В районе критического сечения сопла, где произведение скорости газового потока на его плотность достигает максимального значения, тепловые потоки к стенке также максимальны.

Основной целью при разработке и создании сопла является обеспечение максимальной тяги, необходимой для каждого режима работы реактивного двигателя, т.е. максимального приближения процесса истечения газа из сопла к идеальному при возможно меньших массе и габарите сопла. При этом, когда для каких-либо режимов полета летательных аппаратов требуется не максимальная тяга, а некоторая часть этой тяги, то реактивное сопло должно также обеспечить и минимальное внешнее сопротивление силовой установки.

Под идеальным соплом обычно понимается такое сопло, в котором происходит идеальный процесс расширения. В выходном сечении идеального сопла имеет место параллельный оси поток. Идеальное сопло – это сопло, в котором расширение газа происходит без каких-либо потерь.

Задачами проектирования соплового блока являются:

- выбор типа сопла;
- построение его геометрического контура;
- расчет тепловых потоков по тракту сопла и оценка тяговых характеристик при спроектированном контуре (вычисление потерь удельного импульса).

## 1. Формирование исходных данных

По результатам лабораторной работы №1 и проектированию заряда имеем следующие исходные данные:

- давление в КС:  $p = 16$  МПа;
- реализуемая масса топлива  $\omega = 297$  кг.

Состав топлива приведён в таблице 1.

Таблица 1. Состав смесового топлива

Компонент	Химическая формула	Содержание, %
ПХА	$\text{NH}_4\text{ClO}_4$	75
ПБАК	$\text{C}_{68.8}\text{H}_{97.5}\text{O}_{4.8}$	25

Для проведения расчетов необходимо располагать теплофизическими параметрами продуктов сгорания по тракту сопла: газовой постоянной  $R$ , показателем адиабаты  $k$ , коэффициентом динамической вязкости  $\mu$ , коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ . Они могут быть найдены с помощью программы Tetra по условной формуле топлива. Для расчета по тракту сопла теплофизические параметры могут быть найдены в виде таблиц с последующей интерполяцией, либо прямым расчетом в Tetra по заданному профилю сопла. В данной работе будет использован первый способ. Таблицы теплофизических параметров задаются в виде двумерного массива в зависимости от давления и от температуры. Назначим диапазон температур от 500 до 3500 К с шагом в 50 К, и 4 фиксированных давления 0,1; 1; 10; 20 МПа. Графические зависимости теплофизических параметров представлены на рисунках 1 – 7.

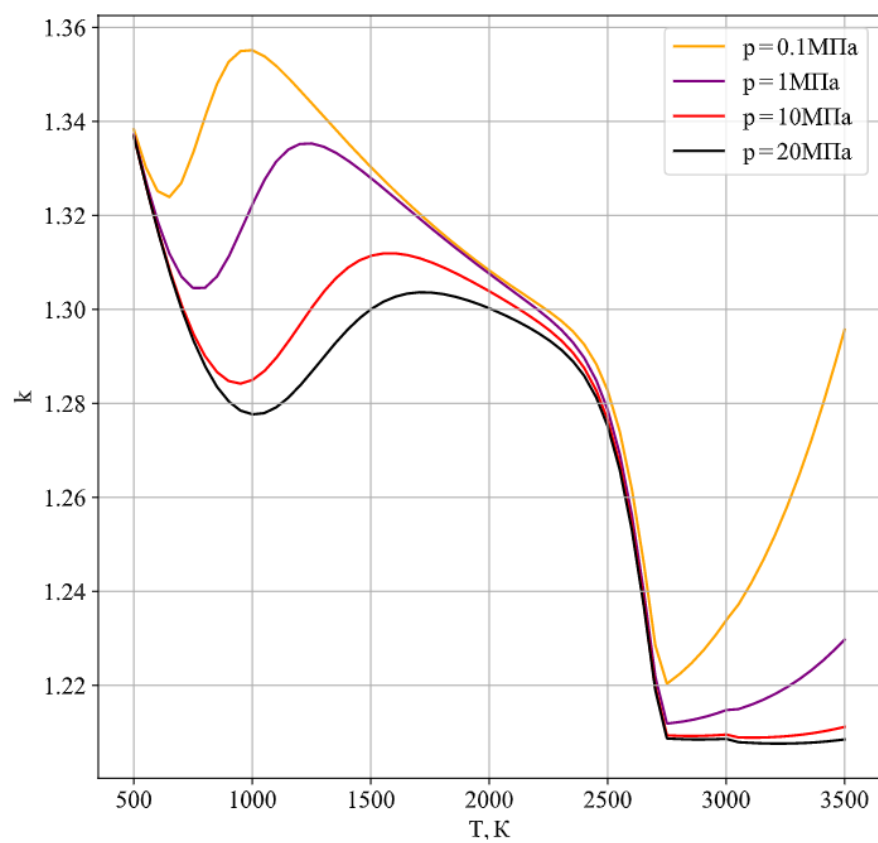


Рис. 1. Значение показателя адиабаты  $k$

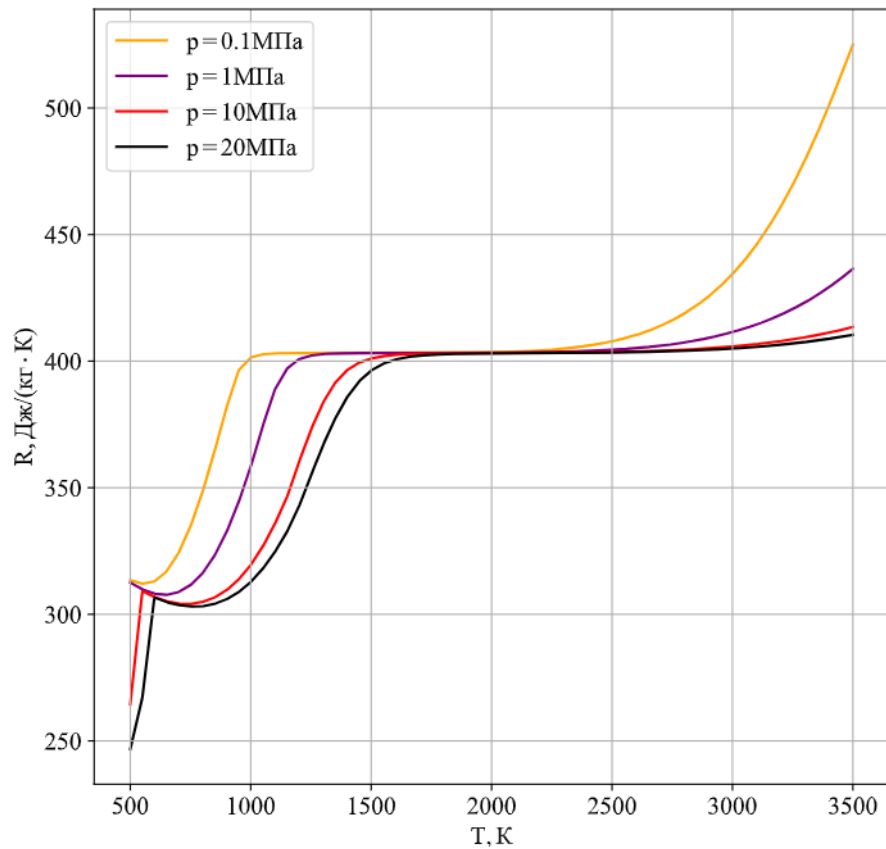


Рис. 2. Значение газовой постоянной  $R_g$

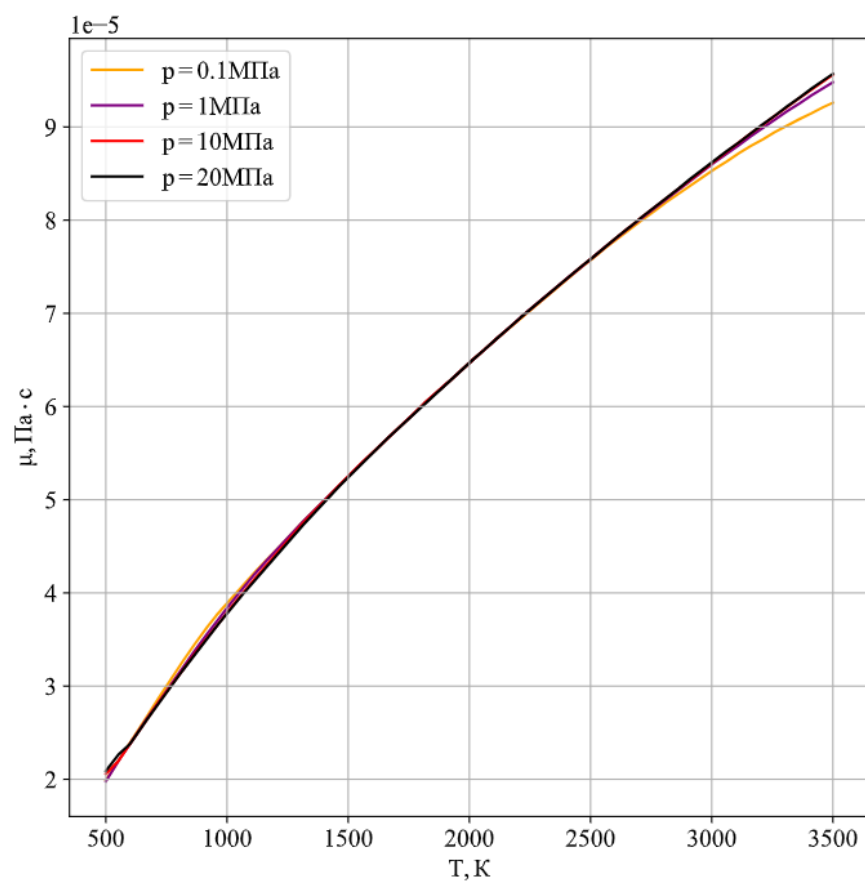


Рис. 3. Значение коэффициента динамической вязкости  $\mu$

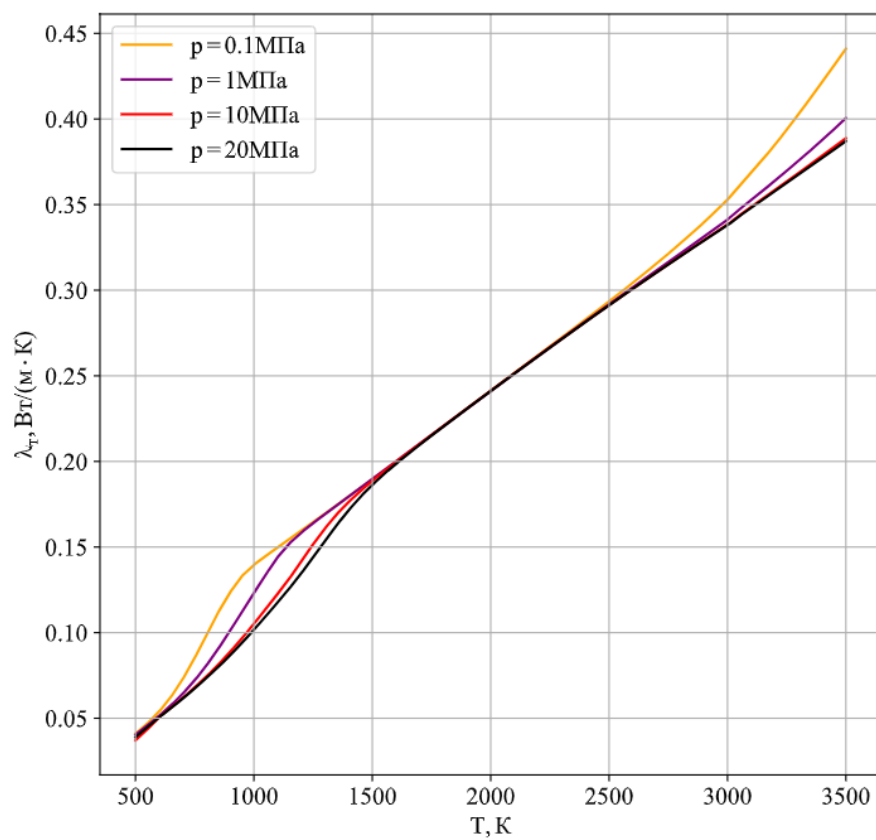


Рис. 4. Значение коэффициента динамической вязкости  $\lambda_T$

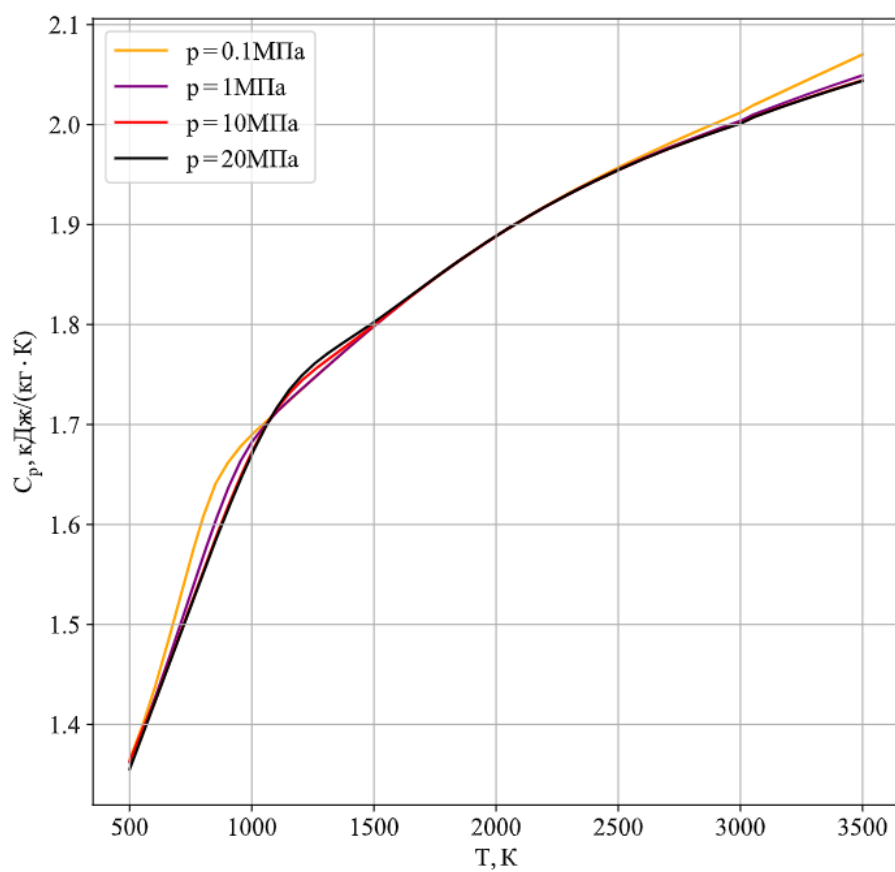


Рис. 5. Значение удельной теплоёмкости  $C_p$

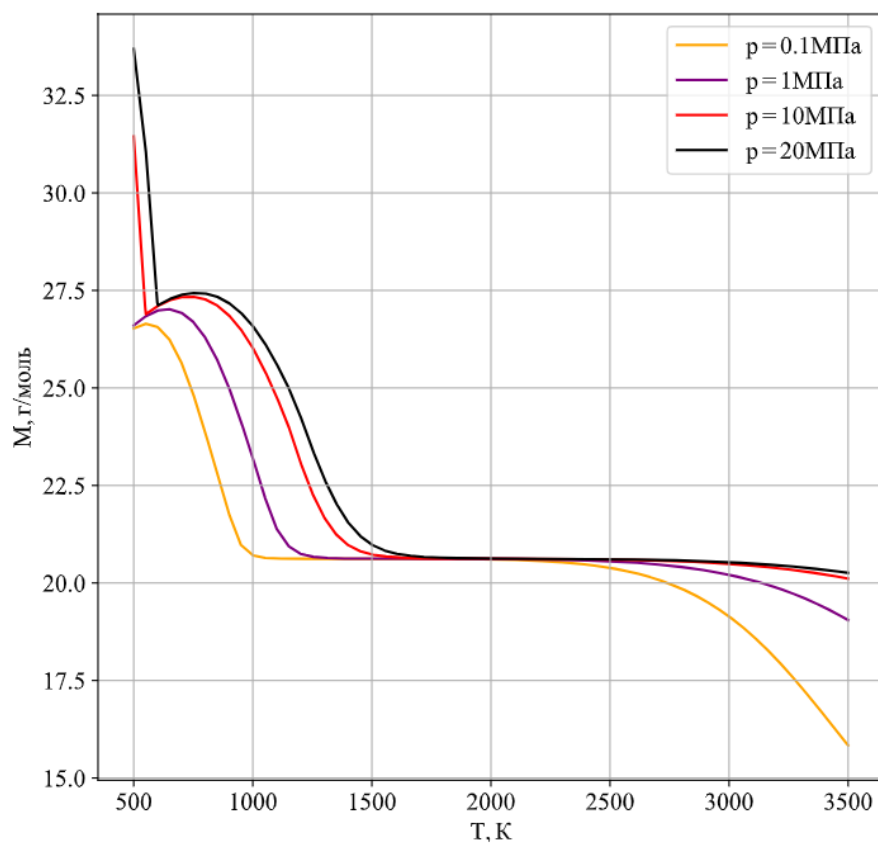


Рис. 6. Значение молярной массы газовой фазы  $M$

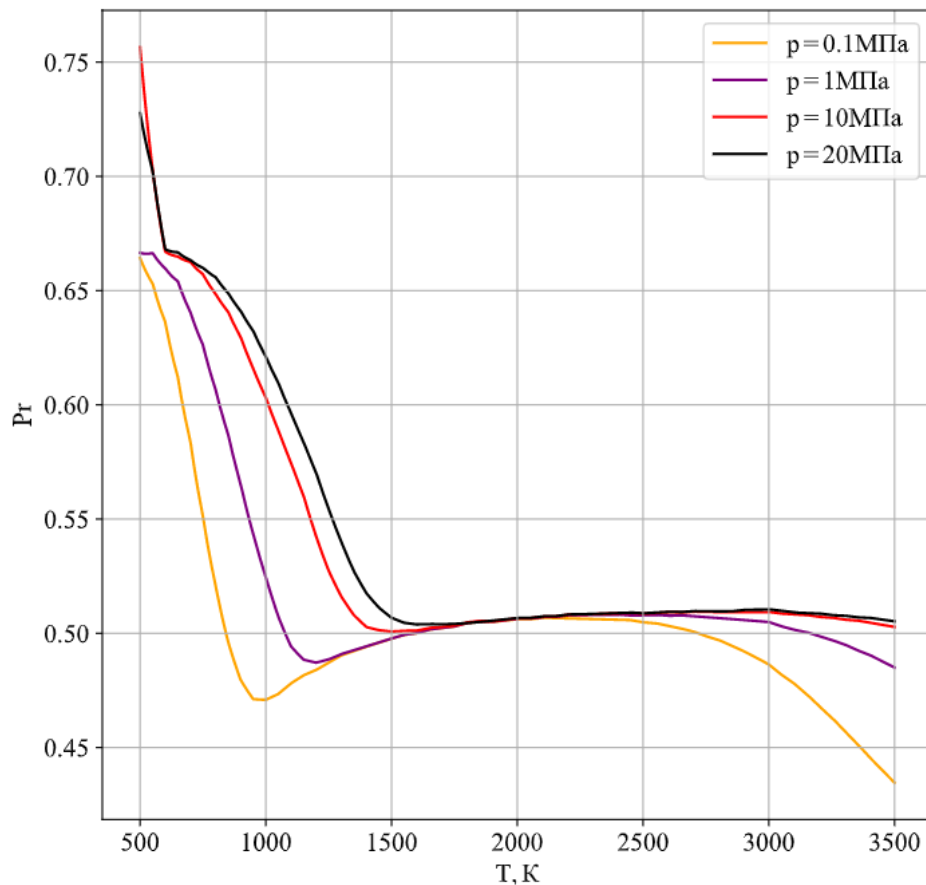


Рис. 7. Значение числа Прандтля  $Pr$

Производится линейная интерполяция, описанная в пособии [1, с. 23] для каждого теплофизического параметра. Число Прандтля находится как

$$Pr(p, T) = \frac{C_p(p, T) \mu(p, T)}{\lambda_T(p, T)}.$$

Для проведения расчетов понадобятся дополнительные параметры топлива:

Характеристики топлива 25% ПБАК, 75% ПХА:

- температура ПС 1874,24 К;
- плотность топлива 1524 кг/м<sup>3</sup>;
- показатель степени в законе горения  $\nu = 0,41$ ;
- закон чувствительности к начальной температуре заряда  
 $F_3(T_3) = \exp(0,003(T_3 - T_N))$ , где  $T_N = 291$  К.
- массовая доля к-фазы  $z \approx 0$ ;
- плотность к-фазы (С) 2260 кг/м<sup>3</sup>;
- удельная теплоемкость к-фазы (С)  $C_s = 710$  Дж/кг·К.



Калорийность топлива может быть определена по следующей формуле

$$Q_{жс} = \frac{k(p_0, T_0)}{k(p_0, T_0) - 1} R(p_0, T_0) T_0 = 3,512 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг.}$$

Для расчета площади критического сечения при наличии к- фазы также необходимо задаться в первом приближении коэффициентами скоростной и температурной неравновесности  $K_v = 0,95$ ;  $K_T = 1,05$ .

На этапе выбора давления в камере сгорания были найдены опорные значения безразмерной скорости потока в выходном сечении сопла и коэффициент уширения, соответствующий расчетному соплу. Однако при этом было сделано допущение, что термодинамические параметры потока в выходном сечении сопла, в частности, показатель адиабаты, равны параметрам в камере. Однако это не так, и при использовании такого допущения при профилировании сопла возникают нерасчетные параметры потока в выходном сечении. Для того, чтобы привести параметры в соответствие, необходимо провести поиск коэффициента уширения сопла при условии переменности термодинамических параметров от давления и температуры, обеспечивающего заданную нерасчетность сопла  $n_c = p_a / p_n$ , т.е. отношение давления в выходном сечении к давлению окружающей среды. Примем требуемую нерасчетность равной  $n = 1$ . Тогда требуемое давление в выходном сечении сопла равно  $p_a = 72484 \text{ Па}$  (проектирование ведется для высоты полета  $H = 3000 \text{ м}$ ). В качестве начального приближения зададим уширение сопла, полученное при выборе давления в камере  $v_a = 16,2$ . Алгоритм решения представлен в пособии [1, с .25].

При решении получены следующие значения:

- коэффициент уширения сопла  $v_a = 17,661$ ;
- безразмерная скорость потока в выходном сечении сопла  $\lambda_a = 2,364$ ;
- температура газов на выходе из сопла  $T_a = 563,107 \text{ К}$ .

Отличие коэффициентов уширения связано с изменением показателя адиабаты.

Для расчета осредненных тепловых потерь  $\chi_{тепл}$  в камере необходимо задаться параметрами теплоотдачи и площадью поверхности охлаждения:

- постоянная коэффициента теплоотдачи теплоизолированной поверхности  $\sigma_T = 300 \text{ Дж}\cdot\text{м}/(\text{кг}\cdot\text{К}\cdot\text{с})$ ;
- относительная разность температур газа и стенки  $v_T = 0.7$ ;
- площадь поверхности охлаждения  $F_{охл} = 2,51 \text{ м}^2$ .

Коэффициент, учитывающий наличие к-фазы

$$\chi_T = \sqrt{\frac{1}{1-z} \left[ 1 + \frac{z}{1-z} \left( \frac{C_s}{C_p(p_0, T_0)} K_T + \frac{k(p_0, T_0) - 1}{k(p_0, T_0) + 1} K_V^2 \lambda_a^2 \right) \right]} = 1.$$

Коэффициент тепловых потерь

$$\chi_{тепл} = 1 - \frac{\sigma_T v_T F_{охл} p_0}{Q_{жс} R(p_0, T_0) G_T} - \frac{k(p_0, T_0)}{k(p_0, T_0) - 1} \frac{p_0}{\rho_T Q_{жс}} = 0,906,$$

где  $G_T$  - средний газоприход от горения топлива, который находится как

$$G_T = \frac{\omega}{t_p} = 74,25 \text{ кг/с.}$$

Для построения профиля сопла необходимо знать внутренний диаметр камеры сгорания. Для этого для выбранного давления рассчитывается толщина стенки обечайки

$$\delta_{ст} = \eta \frac{p_0 D}{2 \sigma_B} F_3(T_{3max})^{\frac{1}{1-\nu}} = 4,5 \text{ мм,}$$

где  $\eta = 1.1$  – коэффициент безопасности для стали,  $D = 0,36$  м – наружный диаметр ДУ,  $\sigma_B = 2100$  МПа – предел прочности (сталь Д6АС (США)),  $T_{3max} = +50 + 273 = 323$  К – максимальная температура заряда.

## 1. Профилирование сопла

Для профилирования сопла необходимо вычислить значения площадей трех основных сечений: входного, критического и выходного.

Диаметр входного сечения определяется как

$$D_{вх} = D - 2\delta_{ст} - 2\delta_{тзп} = 0,343 \text{ м,}$$

где  $\delta_{тзп}$  – толщина теплозащитного покрытия на входе в сопло,  $\delta_{тзп} = 4$  мм.

Площадь критического сечения для общего случая при наличии к-фазы определяется по формуле

$$F_{кр} = \sqrt{\frac{k(p_0, T_0) - 1}{k(p_0, T_0)}} \chi_{тепл} Q_{жс} \frac{G_T}{\mu_c A(k(p_0, T_0)) p_0 N_c \chi_T} \frac{1}{\chi_T} = 5,04 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

где  $\mu_c = 0,95$  - коэффициент расхода,  $N_c = 1$  - количество сопел.

Диаметр критики

$$D_{кр} = \sqrt{\frac{4F_{кр}}{\pi}} = 0,0801 \text{ м.}$$

Диаметр выходного сечения равен

$$D_a = D_{кр} \sqrt{v_a} = 0,336 \text{ м.}$$

По полученным проходным сечениям проводится профилирование сопла (рис. 10) в соответствии с рекомендациями [1, с.14].

Дозвуковая часть профилируется прямой линией с углом наклона  $50^\circ$  из рекомендуемого диапазона. Радиус скругления между камерой сгорания и дозвуковой частью выбирается из диапазона  $0 \dots R_{кс}$ , радиус принимается равным  $0,02$  м. Радиус скругления между дозвуковой частью и критическим сечением выбирается равным  $r_b \approx 2r_{кр} = 0,08$  м, т.к. сопло небольшого размера. Радиус скругления между критическим сечением и сверхзвуковой частью сопла выбирается равным  $r_{скр} \approx 0,5r_{кр} = 0,02$  м. Сверхзвуковая часть сопла профилируется методом огибающей. Отношение радиуса выходного сечения к радиусу критики равно:

$$\frac{R_a}{R_{кр}} = 3,95.$$

Тогда, из графика [1, рис. 4] угол наклона образующей СЗ части сопла на входе равен  $\beta_{вх} = 0,5 \approx 28,42^\circ$ . При этом, отношение  $\frac{L}{R_{кр}} \approx 6,1$ . Полученный профиль сопла представлен на рисунке 1.

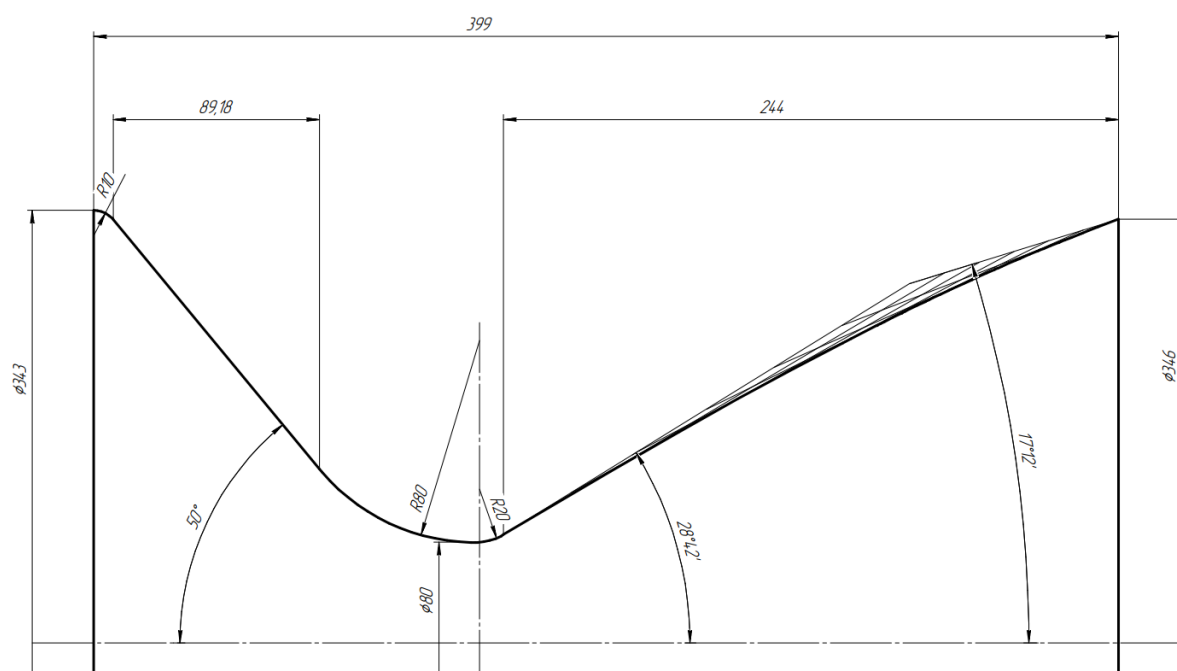


Рис.8. Профиль сопла с указанием конструктивных параметров

Для такого соотношения длины сверхзвуковой части сопла и радиуса критического сечения угол наклона образующей в выходном сечении равен  $\beta_a = 0,3 \approx 17,12^\circ$ . Длина сверхзвуковой части  $L_{сз} \approx 0,244$  м. На этом этапе может быть определена общая длина сопла, равная  $L \approx 0,399$  м.

Для дальнейших расчетов необходим ввод полученной координаты критического сечения сопла  $x_{кр} = 0,148$  м.

Полученный профиль сопла и площадь в каждом  $n$ -ном сечении представлен на рисунке 9.

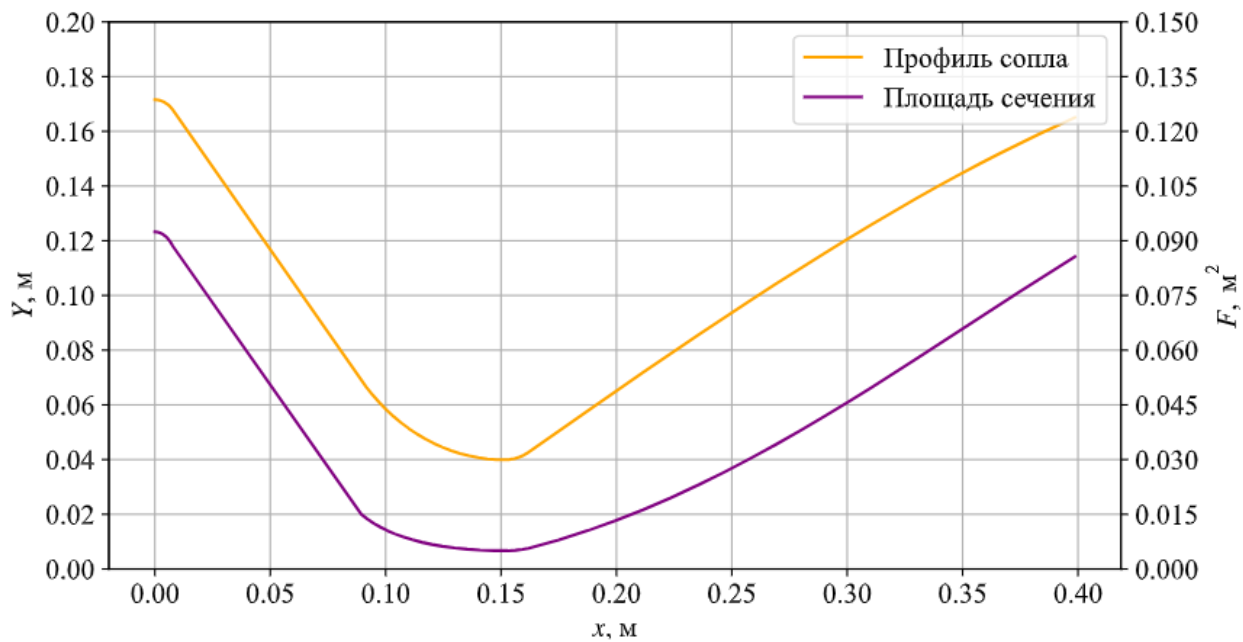


Рис. 9. Профиль сопла и площадь в каждом  $n$ -ном сечении

## 2. Расчет параметров по тракту сопла

Для проектирования конструкции соплового блока необходимо располагать распределением тепловых потоков и газодинамических параметров по его длине. Введем основные формулы расчета в виде функциональных зависимостей. Температура торможения газового потока у поверхности стенки зависит от текущих давления  $p$ , температуры  $T$  и безразмерной скорости потока  $\lambda$  и равна

$$T_r(p, T, \lambda) = T \left( 1 + \frac{k(p, T) - 1}{2} \sqrt[3]{\text{Pr}(p, T) M(p, T, \lambda)^2} \right),$$

где число Маха  $M$  определяется в зависимости от  $\lambda$  по формуле

$$M(p, T, \lambda) = \sqrt{\left[ \frac{2}{k(p, T) + 1} \lambda^2 \right] / \left[ 1 - \frac{k(p, T) - 1}{k(p, T) + 1} \lambda^2 \right]}.$$

По своему определению энтальпия газа у поверхности стенки находится по формуле

$$H_r(p, T, \lambda) = C_p(p, T_r(p, T, \lambda)) T_r(p, T, \lambda).$$

Температура поверхности стенки определяется по формуле

$$T_w(p, T, \lambda) = \overline{T_w} T_r(p, T, \lambda),$$

где  $\overline{T_w} = 0,8$  - температурный фактор.

Энтальпия газа при температуре поверхности стенки равна

$$H_w(p, T, \lambda) = C_p(p, T_w(p, T, \lambda)) T_w(p, T, \lambda).$$

Плотность газа при температуре поверхности стенки равна

$$\rho_w(p, T, \lambda) = \frac{p}{R(p, T_w(p, T, \lambda)) T_w(p, T, \lambda)}.$$

Число Рейнольдса определяется по формуле

$$\text{Re}_w(p, T, \lambda, r) = \frac{V(p, T, \lambda) \rho_w(p, T, \lambda) r}{\mu(p, T)},$$

где  $r$  – радиус текущего сечения, скорость потока вычисляется по формуле

$$V(p, T, \lambda) = M(p, T, \lambda) \sqrt{k(p, T) R(p, T) T}.$$

По полученным функциональным зависимостям определяется число Стантона

$$St^*(p, T, \lambda, r) = 0,0326 \text{Re}_w(p, T, \lambda, r)^{-0,2} \text{Pr}(p, T)^{-0,6} \left( \frac{H_w(p, T, \lambda)}{H_r(p, T, \lambda)} \right)^{0,39} \times \\ \times \left( 1 + \frac{k(p, T) - 1}{2} \sqrt[3]{\text{Pr}(p, T) M^2(p, T, \lambda)} \right)^{0,11}.$$

Коэффициент учета шероховатости стенки

$$k_{ш} = 1 + 0,15k_s^{0,29} = 1,094 ,$$

где параметр шероховатости принят равным  $k_s = 0,2$ .

Коэффициент, учитывающий наличие к-фазы

$$k_p(p, T, \lambda, r) = 1 + 0,0246 \text{Re}_w(p, T, \lambda, r)^{-0,3} \left( \frac{z}{1-z} \right)^{2,45} .$$

Тогда число Стантона с учетом шероховатости стенки и наличия к-фазы равно

$$St(p, T, \lambda, r) = St^*(p, T, \lambda, r) k_{ш} k_p(p, T, \lambda, r) .$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_T(p, T, \lambda, r) = \rho_w(p, T, \lambda) V(p, T, \lambda) St(p, T, \lambda, r) C_p(p, T) .$$

Удельный конвективный тепловой поток

$$q_k(p, T, \lambda, r) = \alpha_T(p, T, \lambda, r) (T_r(p, T, \lambda) - T_w(p, T, \lambda)) .$$

Алгоритм решения задачи в виде цикла представлен в пособии [1, с.32]. Цикл происходит по координате  $x$ , изменяющейся от 0 до длины сопла  $L = 0,399$  м. В итоге вычисляются все необходимые параметры, которые приведены на графиках рис. 10 – 14.

На рисунке 10 приведены скоростные характеристики по тракту сопла: скорость  $V$ , безразмерная скорость  $\lambda$ , число Маха  $M$ . Как видно из рисунка, безразмерная скорость в выходном сечении равна рассчитанной ранее  $\lambda_a = 2,3670$ .

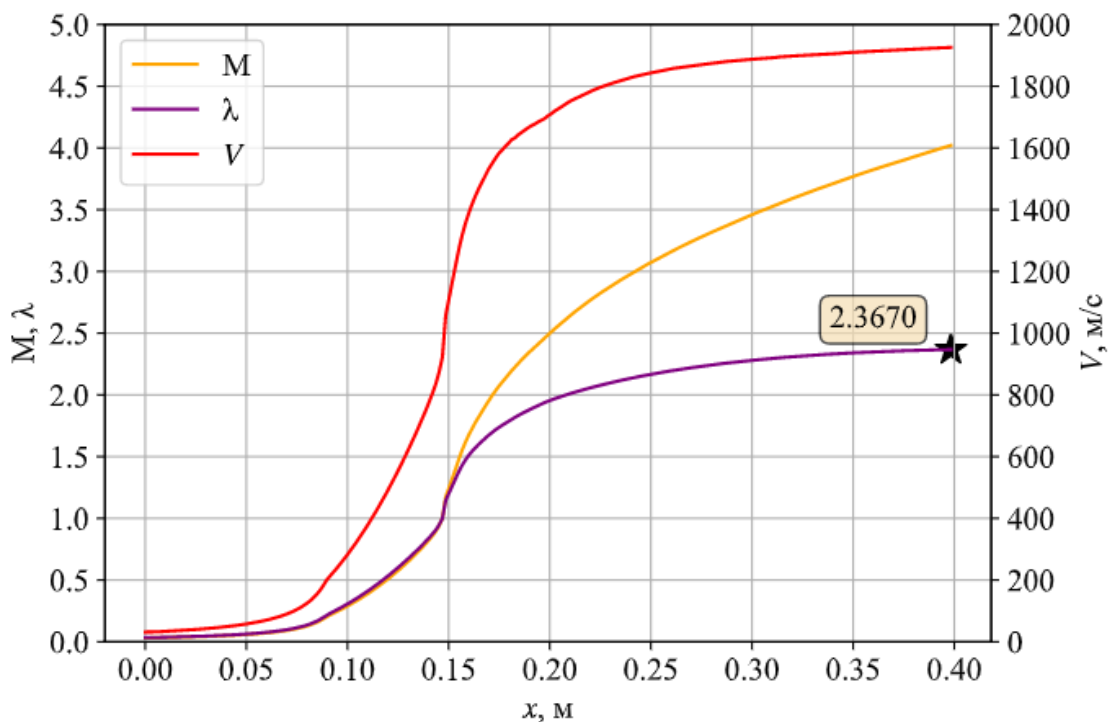


Рис. 10 Скоростные характеристики по тракту сопла

На рисунке 11 приведены графики изменения статического давления и плотности по тракту сопла. Давление в выходном сечении равно  $p_a = 72485$  Па. Отличие от заданного давления 72329 Па составляет менее 1 % и обусловлено погрешностями округления в процессе проведения расчетов.

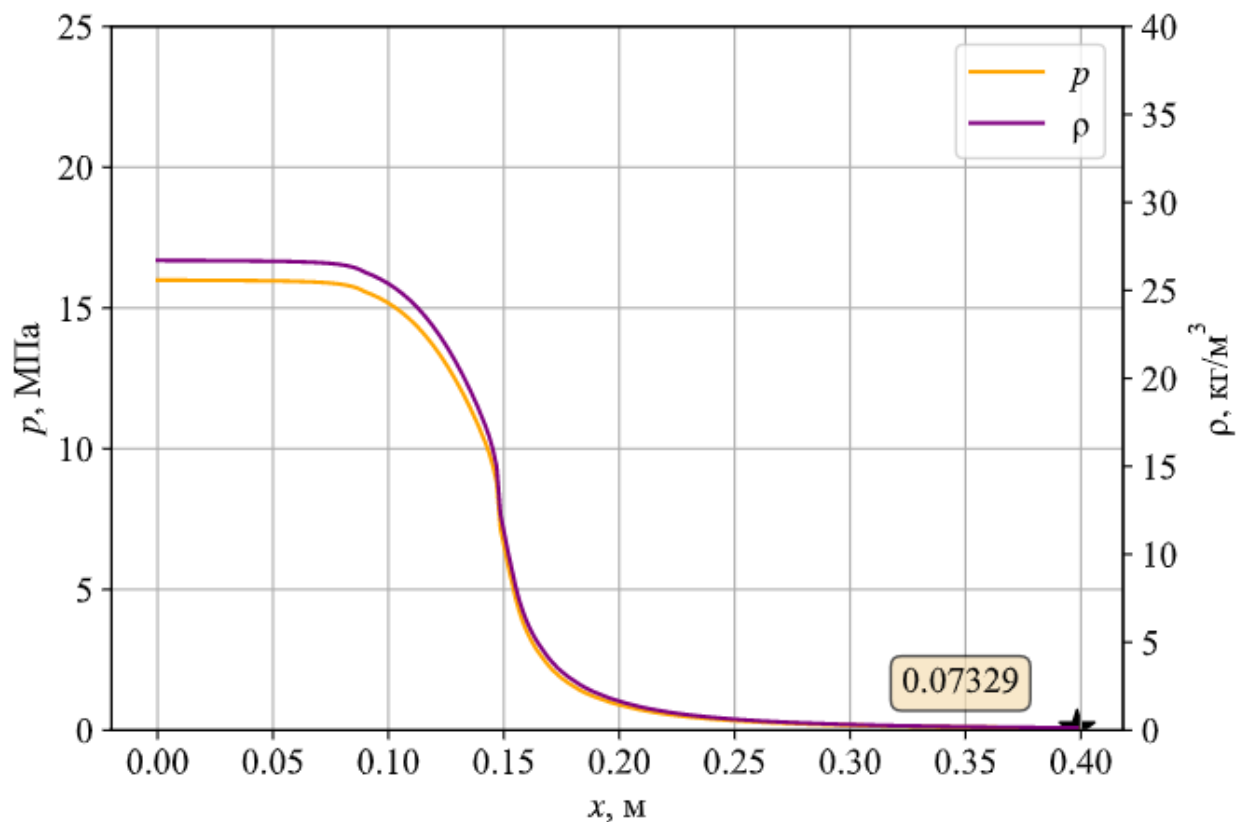


Рис. 11. Изменение давления и плотности по тракту сопла

На рисунке 12 приведены графики изменения температуры потока и температуры восстановления вблизи стенки по длине сопла. Температура в выходном сечении равна  $T_a = 563,1$  К и отличается от определенной ранее (571,8 К) на 2 %, также из-за погрешностей при округлении.

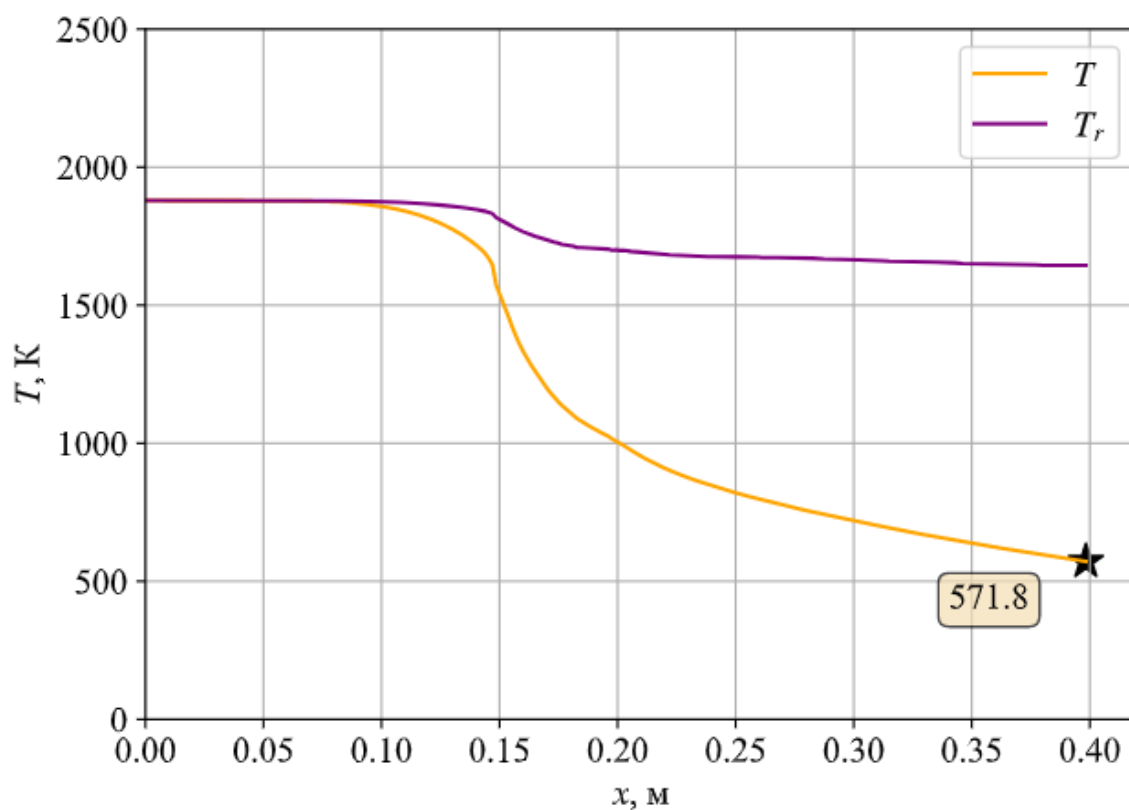


Рис. 12. Статическая температура потока и температура восстановления у стенки

На рисунке 13 приведены графики изменения числа Стантона для гладкой стенки и с учетом шероховатости и к-фазы и числа Рейнольдса по тракту сопла.

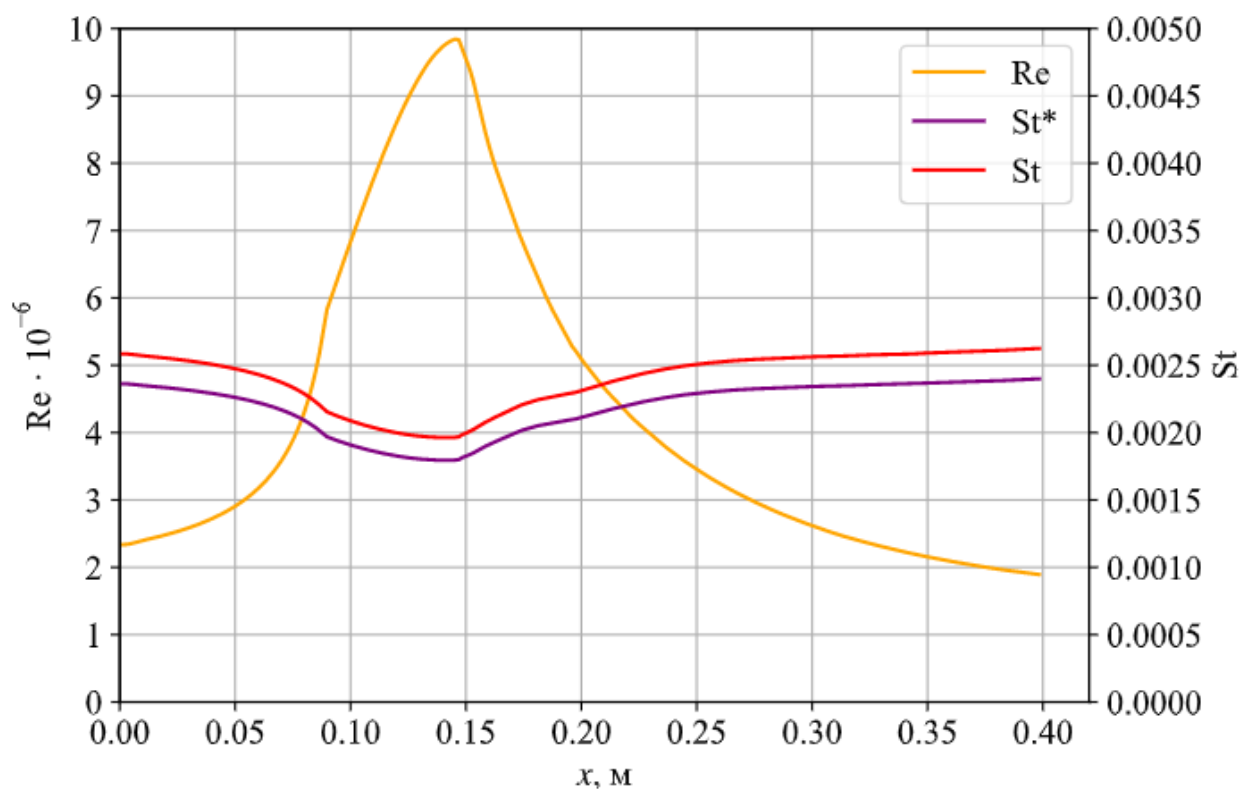


Рис. 13. Числа подобия



На рисунке 14 приведены графики коэффициента конвективной теплоотдачи и удельного конвективного теплового потока  $q_k$ . Удельный тепловой поток достигает максимального значения в критическом сечении сопла.

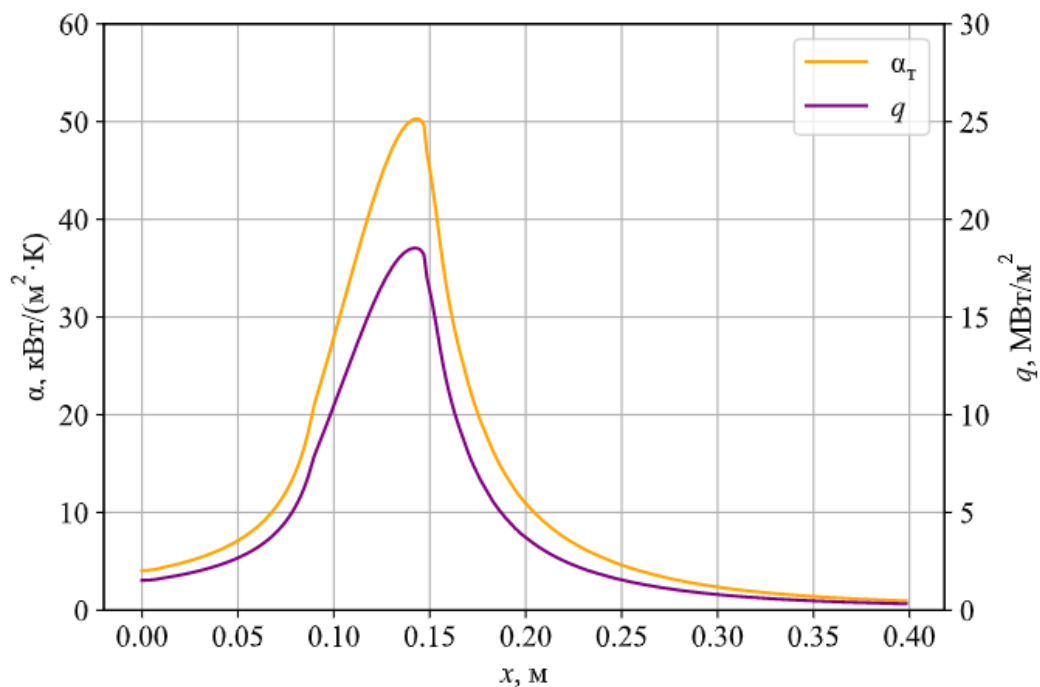


Рис. 14. Удельный конвективный тепловой поток и коэффициент конвективной теплоотдачи по тракту сопла

Рассмотрим мольную концентрацию веществ в продуктах сгорания твердого топлива. Так как одно- и двухатомные молекулы имеют пренебрежимо малую излучательную способность, то они рассматриваться не будут. Из многоатомных веществ, имеющих значимую концентрацию, для выбранного топлива выделим пары воды  $\text{H}_2\text{O}$ , углекислый газ  $\text{CO}_2$ , а также метан  $\text{CH}_4$ . Построим распределение мольной концентрации веществ по тракту сопла. Для этого концентрации, полученные в программе «Терра», аппроксимируются кусочно-линейными функциями по аналогии с термодинамическими параметрами. Графики изменения мольной концентрации многоатомных веществ в продуктах сгорания твердого топлива приведены на рисунке 15.

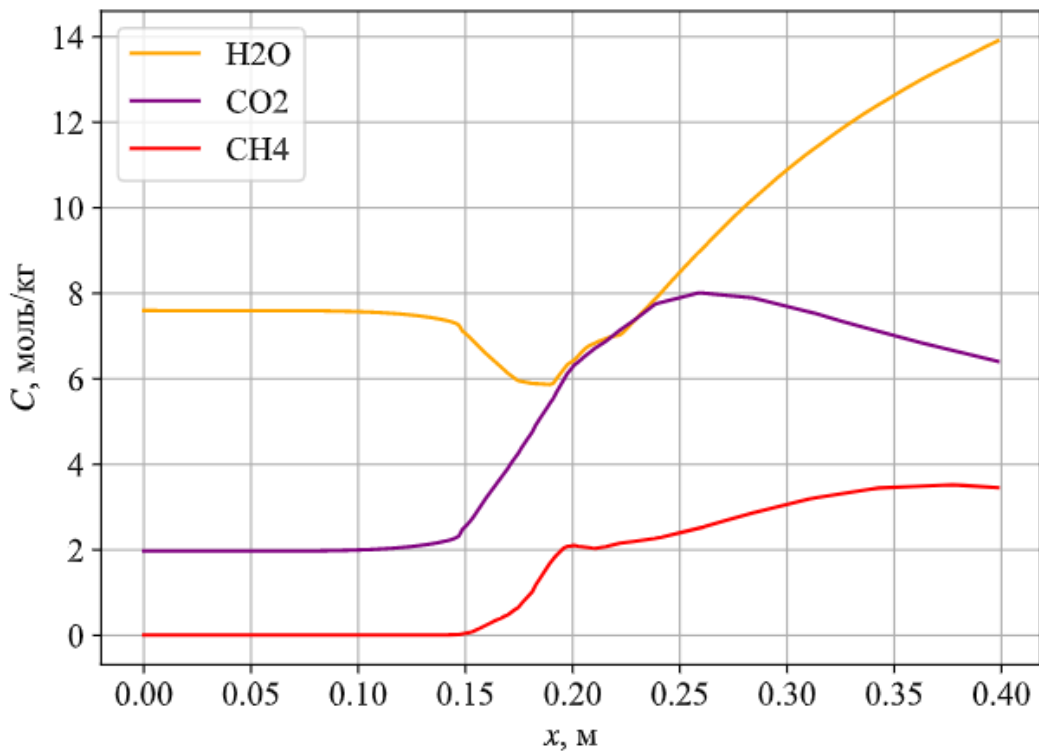


Рис. 15. Изменение мольной концентрации веществ по тракту сопла

Для вычисления парциальных давлений этих газов понадобится аппроксимация молярной массы продуктов сгорания  $M_\mu(p, T)$ .

Для удобства дальнейших вычислений будем рассматривать полученные распределения параметров по тракту сопла в виде функций  $p(x), T(x), T_r(x), T_w(x), C_i(x), M_\mu(x)$ , которые могут быть получены линейной интерполяцией вычисленных массивов.

Парциальные давления газов могут быть вычислены по формуле:

$$p_{H_2O}(x) = C_{H_2O}(x) \cdot M_\mu(x) \cdot 10^{-3} p(x);$$

$$p_{CO_2}(x) = C_{CO_2}(x) \cdot M_\mu(x) \cdot 10^{-3} p(x);$$

$$p_{CH_4}(x) = C_{CH_4}(x) \cdot M_\mu(x) \cdot 10^{-3} p(x);$$

где  $C_{H_2O}, C_{CO_2}, C_{CH_4}$  – мольные концентрации паров воды и углекислого газа, коэффициент  $10^{-3}$  – перевод молярной массы, вычисляемой программой «Терра» в г/моль, в кг/моль. График изменения парциальных давлений приведен на рисунке 16.

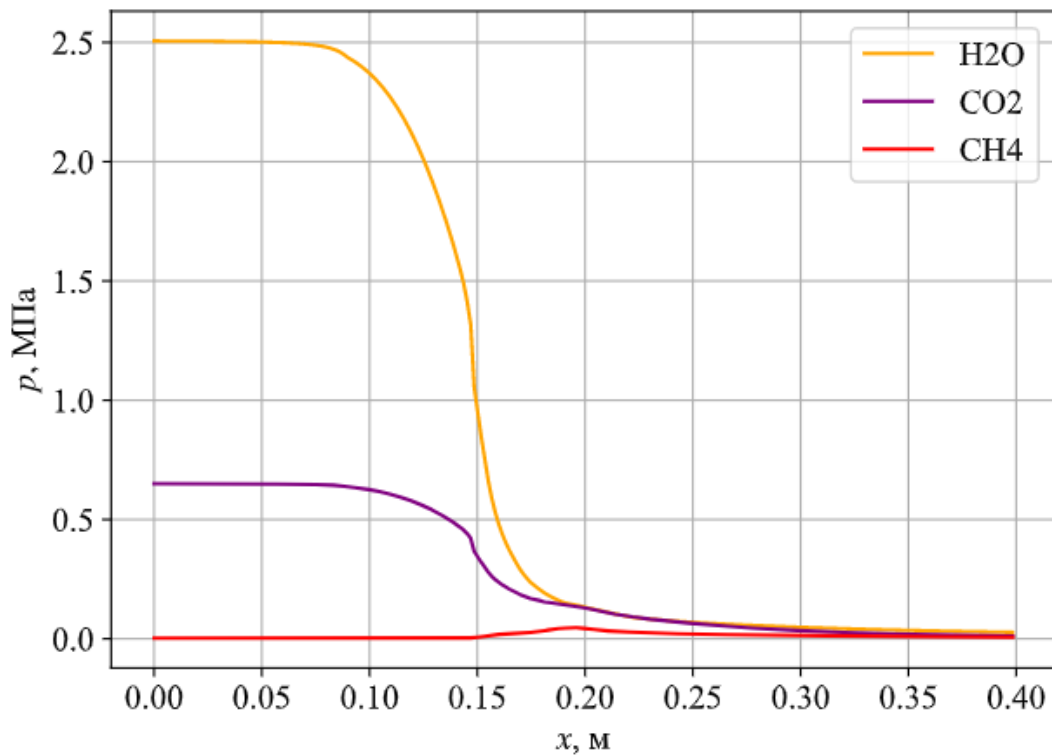


Рис. 16. Изменение парциального давления по тракту сопла

Средняя длина пути луча равна

$$l(x) = 0,9 \sqrt{4F(x)/\pi}.$$

Для определения излучательной способности газа необходима аппроксимация номограмм. Таблицы соответствующих коэффициентов аппроксимации приведены в Приложении 1 пособия [1, с. 45–49]. Излучательные способности могут быть найдены по формулам:

$$\varepsilon_{CO_2}(pl, T) = 0,025 \cdot 10^{a_1(pl) \cdot 10^{-8} T^2 + a_2(pl) \cdot 10^{-5} T + a_3(pl)},$$

$$\varepsilon_{H_2O}(pl, T) = 0,01 \cdot 10^{b_1(pl) T + b_2(pl)},$$

где  $a_i$ ,  $b_i$  – коэффициенты аппроксимации, получаемые линейной интерполяцией относительно параметра  $pl$  (таблицы 1.1 и 1.2 Приложения 1 [1]),  $p$  – парциальное давление газа в бар,  $l$  – средняя длина пути луча в м.

Коэффициент учета влияния давления на излучательную способность паров воды находится по аппроксимационной формуле

$$n(pl, p) = 10^{c_1(pl) \cdot \lg(p)^3 + c_2(pl) \cdot \lg(p)^2 + c_3(pl) \cdot \lg(p) + c_4(pl)},$$

где  $p$  – парциальное давление в бар,  $c_i$  – коэффициент аппроксимации.

Для нахождения излучательной способности паров воды с учетом давления используется формула

$$\varepsilon_{H_2O}(pl, T) = 1 - \left(1 - \varepsilon_{0H_2O}(pl, T)\right)^{n(pl, T)}.$$

Тогда степень черноты газообразных продуктов сгорания равна

$$\varepsilon_r(pl, T) = \varepsilon_{H_2O}(pl, T) + \varepsilon_{CO_2}(pl, T) - \varepsilon_{H_2O}(pl, T) \cdot \varepsilon_{CO_2}(pl, T).$$

Диаметр частиц к-фазы может быть приближенно найден по формуле

$$d_{43} = 10,68 \left(d_{kp} \cdot 10^3\right)^{0,293} \left[1 - \exp\left(-0,1128 \cdot z \cdot t_k p_0 \cdot 10^{-6}\right)\right].$$

где  $d_{kp}$  – диаметр критики, м;  $p_0$  – давление в КС, Па;  $t_k$  – время пребывания частиц в КС, принимается равным 0,5 с (0,1...0,5 с). Тогда  $d_{43} = 6,5$  мкм.

Тогда эффективный коэффициент ослабления луча в продуктах сгорания равен

$$d_n = 0,042 \frac{z}{\rho_{кф}} \sqrt[3]{\frac{T_r(x)}{(d_{43} \cdot 10^{-6})^2}}.$$

Степень черноты ПС с учетом к-фазы равна

$$\varepsilon_{ПС}(x) = 1 - \left(1 - \varepsilon_r(p(x)l(x), T(x))\right) \cdot \exp(-d_n(x)l(x)).$$

Полученные графики степени черноты приведены на рисунке 17.

Тогда удельный тепловой поток за счет излучения может быть определен как

$$q_l(x) = \varepsilon_w \varepsilon_{ПС}(x) \sigma_0 \left(T(x)^4 - T_w(x)^4\right).$$

где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>),  $\varepsilon_w = 0,8$  – степень черноты стенки.

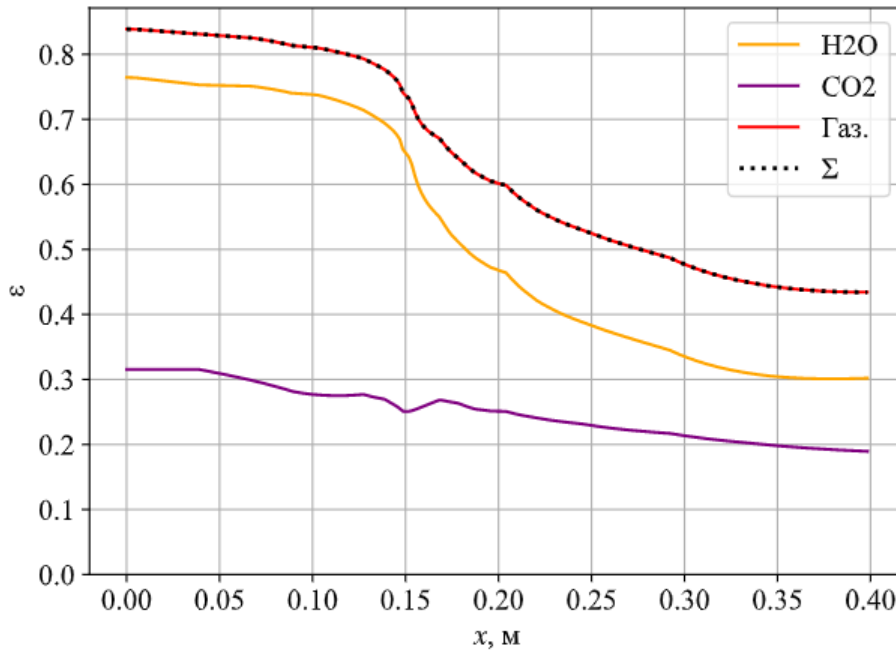


Рис. 17. Степень черноты продуктов сгорания

Суммарный тепловой поток равен

$$q_{\Sigma}(x) = q_l(x) + q_k(x).$$

Результаты расчета удельного теплового потока приведены на рисунке 18.

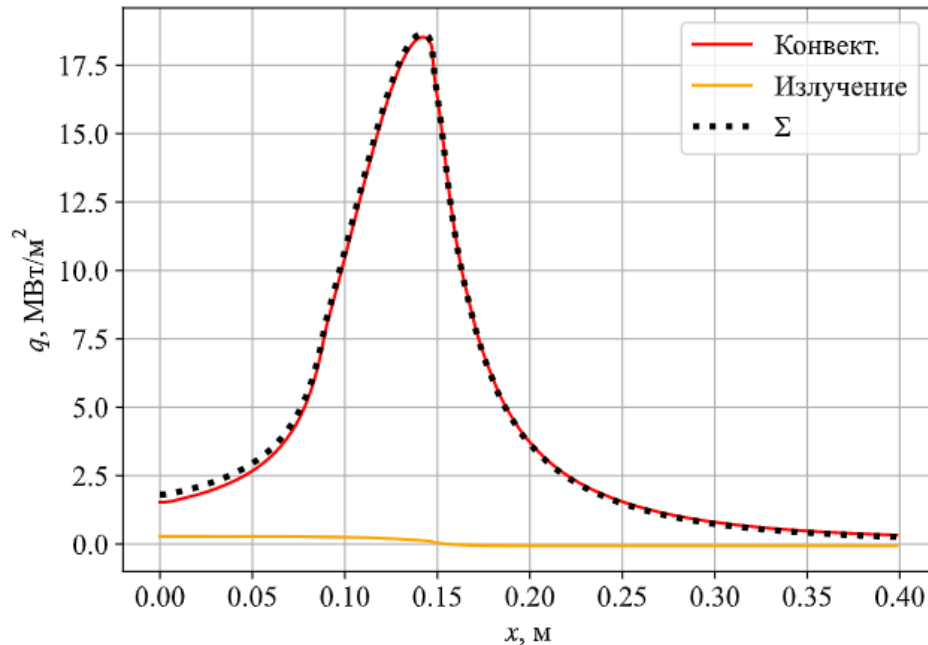


Рис. 18. Удельный тепловой поток к стенке сопла

Таким образом получено распределение суммарных тепловых потоков по тракту сопла, которое может быть использовано для расчета потребной толщины теплозащитного покрытия. Как видно из рисунка, максимальное влияние излучение оказывает в камере сгорания и на входном участке сопла. Из-за падения температуры по мере разгона потока доля удельного теплового потока излучением в суммарном падает.

### 3. Определение потерь удельного импульса

Так как сопло профилированное, то потери удельного импульса на рассеяние находятся по формуле

$$\zeta_p(y_a, \bar{L}) = \left[ 13,2 - (8,9k(p_0, T_0) - 9,8)\sqrt{y_a} \right] \frac{(0,96 - L_0)^6}{(0,37 + 0,114y_a)^2}.$$

где  $y_a = d_a/d_{кр}$  - коэффициент расширения сопла,  $L_0 = L/L_n$  - степень укорочения сопла,  $L_n = 5,88y_a - 5,44$  - полная длина сопла с равномерным потоком на выходе,  $L = L_a/R_{кр}$  - относительная длина сопла,  $L_a$  - длина сверхзвуковой части сопла.

График потерь удельного импульса на рассеяние приведен на рисунке 19. Он показывает степень роста потерь при укорочении сопла и увеличении коэффициента расширения. Потери на рассеяние для спроектированного сопла равны  $\zeta_p = 0,983 \%$ .

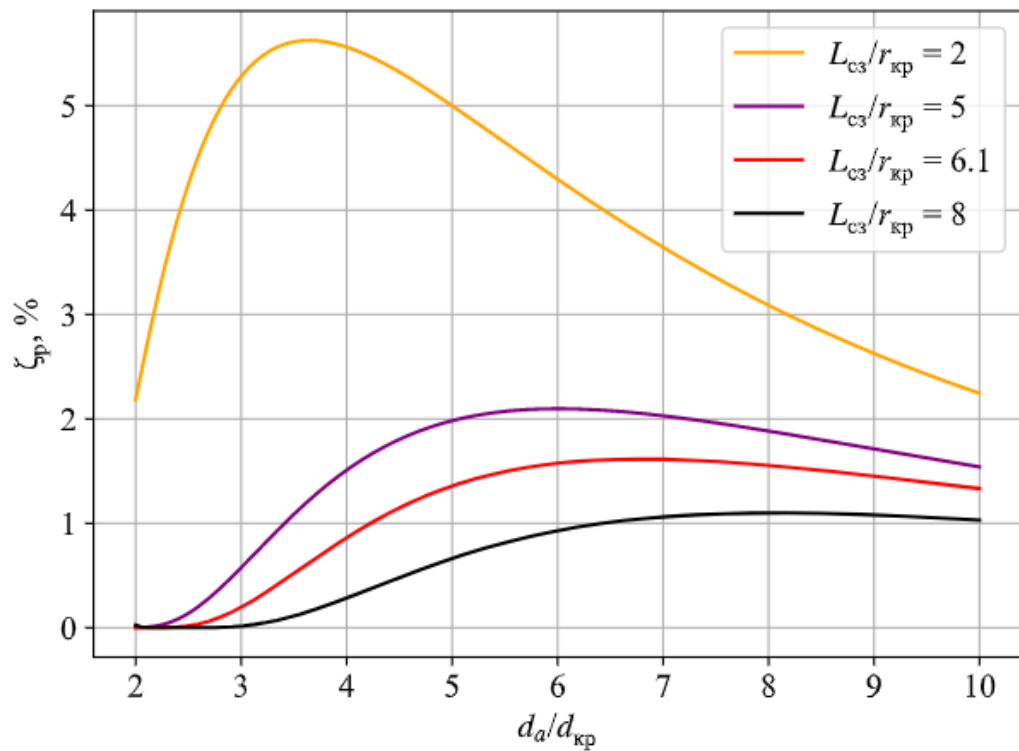


Рис. 19. Потери удельного импульса на рассеяние

Величина потерь на трение определяются по формуле:

$$\zeta_{mp}(y_a, \bar{L}) = 0,56(y_a - 1)^{0,5} \left( \frac{2,62}{k(p_0, T_0)^2 \bar{T}_{cm}^{0,33}} - 1 \right) L_0 (1 + 16,88 \bar{K}_s^{0,4}),$$

где в соответствии с рекомендациями температурный фактор принят равным  $\bar{T}_{cm} = 0,6$ , относительная высота бугорков шероховатости  $\bar{K}_s = 0,002$ .

График потерь удельного импульса на трение приведен на рис. 20. Потери для спроектированного сопла равны  $\zeta_{mp} = 0,694$  %.

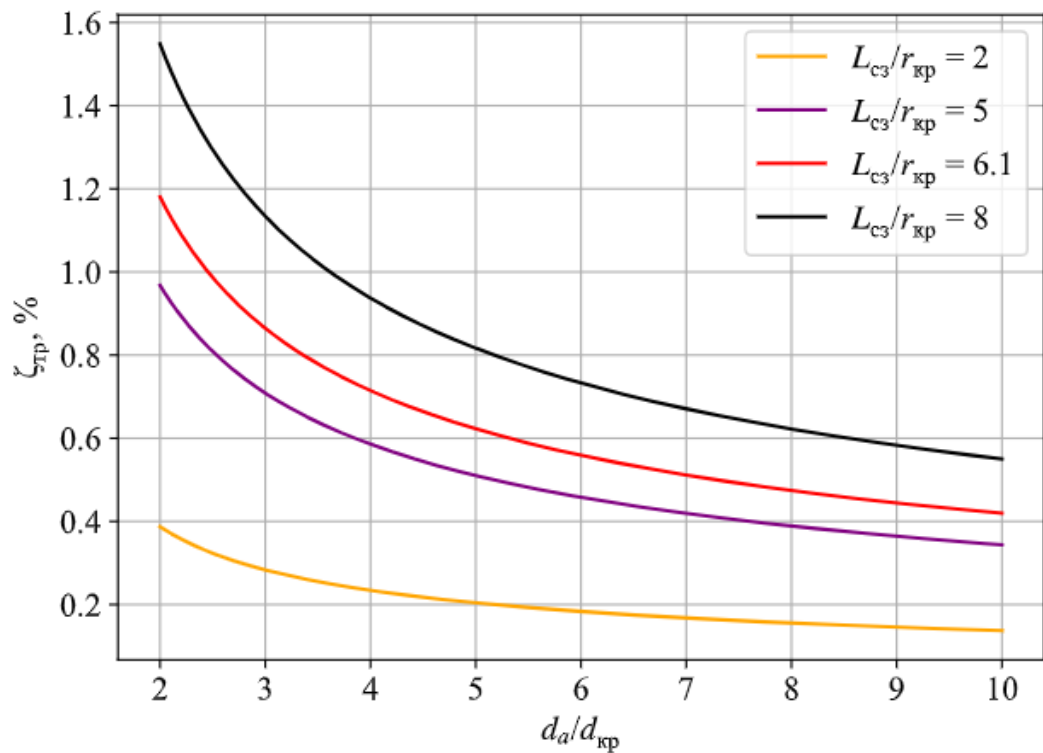


Рис. 20. Потери удельного импульса на трение

Потери на неравновесность к-фазы

$$\zeta_{\partial\partial} = \zeta_0(d_{кр})k_0(z)k_1(p)k_2(L_0)k_3(y_a)k_4(d_{43}),$$

где  $\zeta_0(d_{кр})$  - функция устанавливающая зависимость величины двухфазных потерь от диаметра критического сечения сопла в м (результат в процентах)

$$\zeta_0(d_{кр}) = 14,4(d_{кр} \cdot 10^3)^{-0,33}.$$

$k_0(z)$  - коэффициент, учитывающий массовое содержание в ПС к-фазы

$$k_0(z) = (z/0,3)^2;$$

$$0 < z < 0,5.$$

$k_1(p)$  - коэффициент, учитывающий уровень давления в камере двигателя и обуславливающий снижение потерь при увеличении давления торможения вследствие ускорения процессов релаксации потока

$$k_1(p) = 1,047 - 0,0013p;$$

$$20 < p < 80 \text{ атм.}$$

$k_2(L_0)$  - коэффициент, учитывающий степень укорочения сопла

$$k_2(L_0) = 1,3 - 0,462L_0;$$

$$0,3 < L_0 < 0,5,$$

$k_3(y_a)$  - коэффициент, учитывающий степень расширения сопла и обуславливающий снижение потерь за счет снижения градиента скорости потока по длине сопла

$$k_3(y_a) = 1,112 - 0,037 y_a;$$

$$3 < y_a < 6.$$

$k_4(d_{43})$  - коэффициент, учитывающий влияние начального размера конденсированных частиц

$$k_4(d_{43}) = 1,162 - 0,168 d_{43};$$

$$3 < d_{43} < 7 \text{ мкм}.$$

При отсутствии необходимой информации, принять коэффициенты, равные единице. Результаты расчёта потерь на неравновесность частиц представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчёта потерь на неравновесность частиц

$\zeta_0(d_{кр})$	4,28
$k_0(z)$	1
$k_1(p)$	1
$k_2(L_0)$	1,153
$k_3(y_a)$	0,957
$k_4(d_{43})$	0,336
$\zeta_{\partial\phi}$	0,162 %

Потери на отсутствие кристаллизации рассчитываются по формуле

$$\zeta_{кр} = \frac{z \cdot \Delta i_{nl} (1 - T_a / T_{nl})}{V_a^2} \cdot 100\%,$$

где  $\Delta i_{nl} = 390 \text{ кДж/кг}$ ,  $T_{nl} = 2550 \text{ К}$  – теплота и температура плавления к-фазы;  $z = 0$  – массовая доля к-фазы;  $T_a = 571 \text{ К}$ ,  $V_a = 1925 \text{ м/с}$  – температура и скорость в выходном сечении сопла,

$$\zeta_{кр} = 0 \text{ \%}.$$

Вызваны отсутствием выделения теплоты фазового перехода частицы из жидкого в твердое состояние и, как следствие, снижением скорости истечения. Эти потери связаны с



тем, что в укороченных соплах температура потока может не опускаться ниже температуры плавления к-фазы и, соответственно, частица не будет переходить в твердое состояние. Однако в реальности из-за малых времени пребывания частицы в сопле и вероятности образования центров кристаллизации, отвердевание происходит при температурах ниже температуры плавления и частица находится в состоянии переохлажденной жидкости. Это затрудняет проведение расчетов данного типа потерь.

Из-за утопленности сопла увеличивается радиальная составляющая скорости частиц, растет неравномерность их распределения по радиусу. В результате возникают потери, которые могут быть приближенно оценены по формуле

$$\zeta_{ym} = 7 \left( \frac{z \cdot P_0 \cdot F_{кр}}{F_{ex}} \right)^{0,8} \bar{L}_{ym}^{0,4} \cdot d_{кр}^{-0,2} \cdot 100\%,$$

где  $\bar{L}_{ym}$  - отношение длины утопленной части сопла к длине заряда (сопло не утоплено), диаметр критики берется в мм.

Откуда  $\zeta_{ym} = 0\%$ .

Тепловые потери примем равными  $\zeta_{тепл} = 0\%$  (крупногабаритный двигатель).

Суммарные потери удельного импульса равны

$$\zeta = \zeta_p + \zeta_{тр} + \zeta_{дв} + \zeta_{кр} + \zeta_{ym} + \zeta_{тепл} = 1,839\%.$$

С учетом потерь значение удельного импульса составляет 2158 м/с

## Выводы

По результатам проделанной работы было выполнено следующее:

- по исходным данным рассчитаны параметры ПС в программе Tetra для заданного диапазона температур и давлений, произведена линейная интерполяция данных;
- для того, чтобы привести параметры в соответствие, был проведён поиск коэффициента уширения сопла при условии переменности термодинамических параметров от давления и температуры, обеспечивающего заданную нерасчетность сопла  $n = 1$  ( $p_a = 72484$  Па). Первоначально коэффициент уширения имел значение  $v_a = 16,2$ , после уточнения имеет значение  $v_a = 17,61$ ; посчитана безразмерная скорость в выходном сечении  $\lambda_a = 2,364$  и температура газов в выходном сечении сопла  $T_a = 471$  К.
- произведено профилирование сопла на рис. 1, исходя из конструктивных особенностей ДУ и рекомендаций;
- произведены расчет параметров по тракту сопла и их визуализация рис. (10 – 14);
- выполнено сравнение безразмерной скорости потока, давления и температуры в выходном сечении сопла с рассчитанными ранее значениями, погрешность составила менее 1 %;
- из программы Tetra были взяты молярные концентрации воды, углекислого газа и метана для последующего определения излучательной способности ПС, также выполнена визуализация на рисунке 15, из которой видно, что вклад метана незначителен;
- определено изменение парциального давления по тракту сопла с выполнением визуализации на рисунке 16;
- определена степень черноты для паров воды, углекислого газа, их совокупности и их совокупности с учётом к-фазы. Визуализация представлена на рисунке 17;
- по известным значениям степени черноты определяется распределение удельного теплового потока по тракту сопла. Выполнена визуализация на рисунке 18;
- были определены потери удельного импульса на рассеяние  $\zeta_p = 0,983$  % (визуализация представлена на рис 19), на трение  $\zeta_{тр} = 0,694$  % (визуализация

представлена на рис 20), на неравновесность к-фазы  $\zeta_{\partial\phi} = 0,162 \%$  (результаты расчёта потерь на неравновесность частиц представлены в табл. 2), на отсутствие кристаллизации  $\zeta_{кр} = 0 \%$ , на утолщенность сопла  $\zeta_{ум} = 0 \%$ , на тепловые потери  $\zeta_{тепл} = 0 \%$ . Суммарные потери удельного импульса составили  $\zeta = 1,839 \%$ , т.е. при теоретическом импульсе 2198 м/с, значение с учетом потерь составили 2158 м/с.

### Список литературы

1. Профилирование сопла и расчет тепловых потоков по его тракту: Методические указания по выполнению лабораторной работы – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 52 с., ил.