



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 РО»

НА ТЕМУ:
Одномерные течения в камере РДТТ

Выполнил: студент группы _____ СМ6-92 _____ Широкопетлев Н.К.
(подпись, дата) (И.О. Фамилия)

Преподаватель _____ Федоров. А.А.
(подпись, дата) (И.О. Фамилия)

Москва, 2022 г.

Оглавление

Введение	3
1. Теоретическая часть	4
1.1. Построение математической модели, участок «д-к»	5
1.2. Построение математической модели, участок «к-кр»	7
2. Практическая часть	9
Заключение	18
Список использованной литературы	20

Введение

В ряде РДТТ для увеличения площади горения применяют заряды с каналами различного поперечного сечения. Для улучшения массовых характеристик двигателя при проектировании такого заряда стремятся к повышению коэффициента заполнения поперечного сечения ϵ_s , что позволит разместить ту же массу заряда на меньшей длине, а, следовательно, уменьшить массу конструкции двигателя в целом. Повышение коэффициента заполнения приводит к уменьшению проходного сечения канала и росту скорости в нем.

Следствием этого является рост перепада давлений по длине заряда, появление эррозионных эффектов и рост давления на начальной стадии горения. При рассмотрении задачи ОЗВБ в нульмерной постановке параметры в камере рассматривались осредненными по объему и зависящими только от времени. Для канального заряда из-за разгона потока давление по длине уменьшается. В результате давление у переднего днища будет выше, чем у заднего. Давление у соплового днища определяет расходные характеристики двигателя при заданной площади критического сечения и является основным проектным параметром. Таким образом, для проведения расчетов на прочность переднего днища необходимо брать более высокое давление и, следовательно, его масса возрастает [1].

1. Теоретическая часть

Для проведения расчетов основных параметров потока по длине заряда задаётся математическая модель. При построении математической модели одномерного течения в камере РДТТ используются следующие допущения:

- рассматривается квазистационарный процесс (частные производные по времени малы по сравнению с частными производными по координате);
- во внутреннем объеме ДУ температура газов сохраняется постоянной, равной температуре горения топлива;
- рассматривается заряд с каналом постоянного сечения.

Используемая расчетная схема представлена на рисунке 1. В качестве характерных выделены четыре сечения:

- д – переднее днище;
- к – выходное сечение заряда;
- кр – критическое сечение сопла;
- а – выходное сечение сопла.

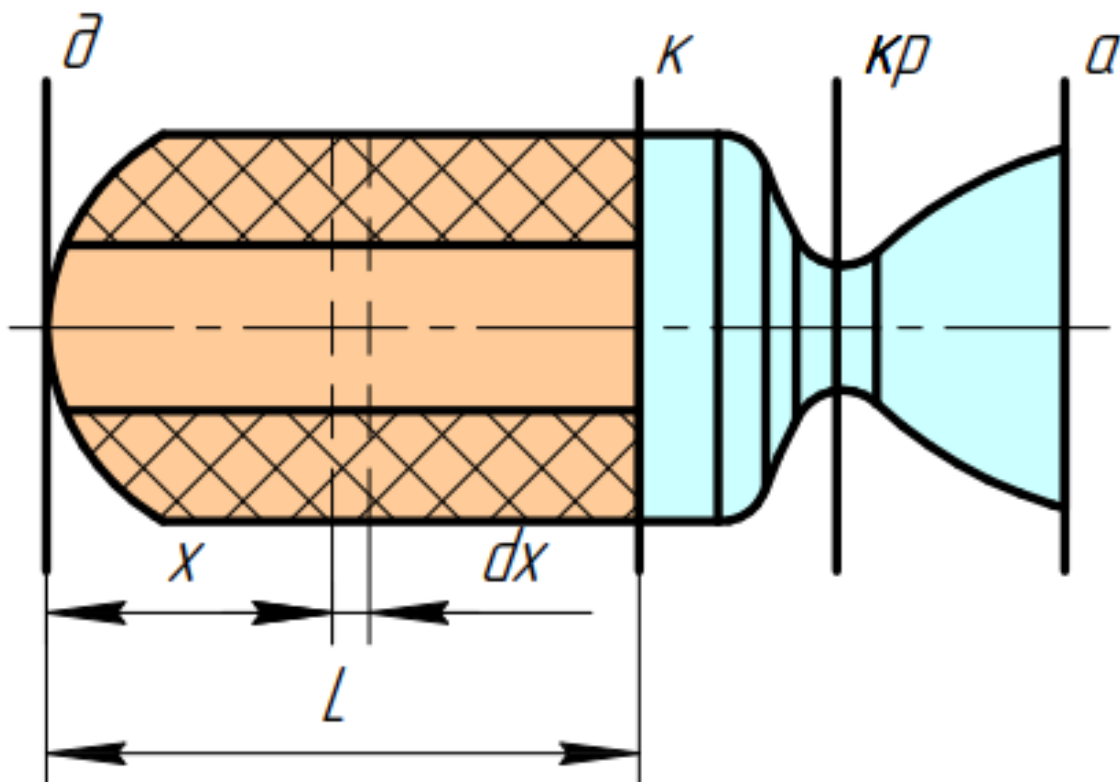


Рисунок 1. Расчетная схема

1.1. Построение математической модели, участок «д-к»

Данный участок ограничен торцами заряда. Уравнение количества движения для канала постоянного сечения имеет вид

$$\dot{m}V + pF = \text{const} = I_p \quad (1)$$

В начальном сечении у переднего днища скорость потока равна 0, следовательно, количество движения I_p равно:

$$I_p = p_d F, \quad (2)$$

где p_d – давление у переднего днища, F – площадь поперечного сечения канала заряда.

Для любого выбранного сечения уравнение количества движения может быть записано с помощью ГД функции $r(\lambda)$:

$$\dot{m}V + pF = \frac{pF}{r(\lambda)} = \text{const}; \quad (3)$$

$$r(\lambda) = \frac{1 - \frac{k-1}{k+1}\lambda^2}{1 + \lambda^2} \quad (4)$$

Сопоставив уравнение 1–3, получим, что статическое давление вдоль канала изменяется по закону:

$$p = p_d \cdot r(\lambda) \quad (5)$$

Для вывода уравнения сплошности необходимо выделить элементарный участок горения протяженностью dx . Изменение расхода через поперечное сечение канала на участке dx равно газоприходу на этом участке:

$$d\dot{m} = \rho_T \Pi_T u_1 p^v f_2(\lambda) dx, \quad (6)$$

где:

- ρ_T – плотность топлива;
- Π_T – периметр горения;
- u_1 – единичная скорость горения при текущей температуре заряда
- $f_2(\lambda)$ - поправка на зависимость скорости горения от скорости омывающих заряд ПС;

- $u_1 p^\nu f_2(\lambda) = u_r.$

Общее выражение для расхода газов с учетом уравнения (5) через произвольное сечение

$$\dot{m} = \rho VF = \frac{p}{\chi RT_0} VF = \frac{p_d}{\chi RT_0} \lambda a_{кр} F \cdot r(\lambda) \quad (7)$$

Продифференцировав уравнение (7) и подставив его в (6), получим

$$d\dot{m} = \frac{p_d}{\chi RT_0} a_{кр} F \left\{ r(\lambda) + \lambda \frac{d}{d\lambda} r(\lambda) \right\} d\lambda = \rho_t \Pi_r u_1 p^\nu f_2(\lambda) dx. \quad (8)$$

Проинтегрируем это выражение, предварительно переместив все слагаемые, зависящие от λ , в левую часть уравнения. При интегрировании разделим всю длину заряда на два участка: с эрозионным и без эрозионного горения. Обозначим $x_{пр}$ – координату, в которой скорость потока превышает пороговое значение $\lambda_{пр}$ и начинается эрозионное горение. Поправка на зависимость скорости горения от скорости омывающих заряд продуктов сгорания используется в форме Шапиро

$$f_2(\lambda) = 1 + k_\lambda (\lambda - \lambda_{пр}) \quad (9)$$

Для участка безэрозионного горения выражение будет иметь вид

$$\int_0^{\lambda_{пр}} \frac{\varphi(\lambda) d\lambda}{r(\lambda)^\nu} = \frac{\rho_t \Pi_r u_1 \chi RT_0}{p_d^{1-\nu} a_{кр} F} x_{пр} \quad (10)$$

Для участка эрозионного горения интегрирование уравнения дает выражение

$$\int_0^{\lambda_{пр}} \frac{\varphi(\lambda) d\lambda}{r(\lambda)^\nu [1 + k_\lambda (\lambda - \lambda_{пр})]} = \frac{\rho_t \Pi_r u_1 \chi RT_0}{p_d^{1-\nu} a_{кр} F} (x - x_{пр}) \quad (11)$$

Для получения суммарного расхода сложим два уравнения и введем новое обозначение

$$\Phi(\lambda) = \int_0^{\lambda_{пр}} \frac{\varphi(\lambda) d\lambda}{r(\lambda)^\nu [1 + k_\lambda (\lambda - \lambda_{пр})]} + \int_0^{\lambda_{пр}} \frac{\varphi(\lambda) d\lambda}{r(\lambda)^\nu}$$

Тогда

$$\Phi(\lambda) = \frac{\rho_T S_6 u_1}{p_d^{1-\nu} F} \sqrt{\frac{k+1}{2k} \chi R T_0}, \quad (12)$$

где $S_6 = \Pi_r x$ – боковая площадь горения заряда.

Расход газа в конечном сечении заряда найдем по формуле

$$\dot{m}_k = \frac{A(k) F_k q(\lambda_k) p_{0k}}{\sqrt{\chi R T_0}}. \quad (13)$$

Так как полное давление потока в этом сечении равно:

$$p_{0k} = \frac{p_k}{\pi(\lambda_k)}, \text{ то}$$

$$\dot{m}_k = \frac{A(k) F_k \gamma(\lambda_k) p_k}{\sqrt{\chi R T_0}}$$

При решении ряда задач целесообразно использовать скорость горения, осредненную по длине заряда. Обозначим через K_U отношение этой средней скорости горения к скорости торцевого горения этого же топлива. Тогда газоприход по длине заряда, равный его расходу в сечении «к», можно представить как

$$\dot{m}_k = \rho_T u_1 p_k^\nu S_6 K_U. \quad (14)$$

Используя уравнение (12), получим

$$K_U = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \frac{\gamma(\lambda_k) [r(\lambda_k)]^{1-\nu}}{\Phi(\lambda_k)}. \quad (15)$$

1.2. Построение математической модели, участок «к-кр»

На этом участке имеют место значительные гидравлические потери, связанные с диссипацией механической энергии потока газов, поступающих из полости заряда в предсопловой объем. Эти потери определяются на основе общих зависимостей гидравлики:

$$\Delta p_c = \xi \frac{\rho_k V_k^2}{2}, \quad (16)$$

где ξ - коэффициент гидравлических потерь, определяемый экспериментально или на основе численного расчета.

Определив плотность газа из уравнения состояния через статическое давление в выходном сечении канала и выразив скорость через безразмерную скорость потока, получим

$$\Delta p_c = \xi \frac{k}{k+1} p_k \lambda_k^2. \quad (17)$$

Уравнение сплошности для участка «к-кр» имеет вид:

$$\dot{m}_c = \dot{m}_k + \dot{m}_T, \quad (18)$$

где \dot{m}_c – суммарный расход газов через сопло, \dot{m}_T – приход газов с обращенного к соплу торца заряда. Подставив соответствующие выражения, получим:

$$\dot{m}_c = \rho_T u_1 p_k^v S_6 K_U + \rho_T u_1 p_T^v S_T, \quad (19)$$

где p_T – давление у торцевой поверхности.

Принимаем $p_T = p_k$, т.к. газоприход с торцевой поверхности составляет малую долю общего прихода.

Обозначим $\bar{S} = \frac{S_T}{S_6}$. Тогда расход газов через сопла можно выразить как:

$$\dot{m}_c = \rho_T u_1 p_k^v S_6 (K_U + \bar{S}) = \frac{\mu_c A(k) F_{кр} \sigma_c p_{0к}}{\sqrt{\chi R T_0}}.$$

где σ_c - коэффициент восстановления полного давления в ПСО

$$\sigma_c = \frac{p_{0к} - \Delta p_c}{p_{0к}} = 1 - \frac{\Delta p_c}{p_{0к}} = 1 - \xi \frac{k}{k+1} \pi(\lambda_k) \lambda_k^2. \quad (21)$$

Давление в камере

$$p_k = \left[\frac{\rho_T u_1 S_6 (K_U + \bar{S}) \sqrt{\chi R T_0} \pi(\lambda_k)}{\mu_c A(k) F_{кр} \sigma_c} \right]^{\frac{1}{1-v}}. \quad (22)$$

Полученная зависимость представляет собой модификацию формулы для давления в случае нульмерной постановки, но учитывающую в интегральной форме изменение скорости горения и давления по тракту двигателя.

2. Практическая часть

Расчет проводится для заряда типа «звезда».

Достоинства заряда с каналом звездообразного сечения:

- развитая поверхность горения;
- высокий коэффициент заполнения поперечного сечения по сравнению с зарядом с цилиндрическим каналом при одинаковой толщине свода;

Основными геометрическими параметрами данного типа заряда являются:

- количество лучей «звезды» n ;
- полуугол выступа θ ;
- радиус скругления луча «звезды» r .

Полуугол выступа θ определяется из условия постоянства площади поверхности горения при заданном числе лучей n , методом половинного деления на отрезке от 0 до $\frac{\pi}{2}$.

Для заряда с каналом звездообразного сечения можно выделить 3 стадии горения:

1. горение по цилиндрическим и плоским поверхностям;
2. горение только по цилиндрическим поверхностям (преимущественно прогрессивное);
3. горение дегрессивных остатков.

При последующих расчетах предполагается, что торцы заряда забронированы и они плоские. В этом случае площадь поверхности горения пропорциональна периметру профиля поперечного сечения канала:

$$S(z) = P(z) \cdot l$$

Зависимость периметра горения заряда для трёх стадий горения:

$$P(e) = \begin{cases} 2n(\alpha_1(r + e) + b(e)), & \text{если } 0 \leq e \leq e_1, \\ 2n\alpha_2(e)(r + e), & \text{если } e_1 \leq e \leq e_2, \\ 2n\alpha_3(e)(r + e), & \text{если } e_2 \leq e \leq e_3. \end{cases}$$

Геометрические параметры заряда представлены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические параметры заряда

Количество лучей n	8
Полуугол выступа θ , град	$37,8^\circ$
Радиус скругления луча r , м	0,006
Диаметр заряда $D_{\text{нар}}$, м	0,343
Длина заряда L , м	2,565
Толщина горящего свода e_1 , м	0,0138
Толщина горящего свода e_2 , м	0,0324
Толщина горящего свода e_3 , м	0,0499

Зависимость площади горения от толщины горящего свода $S_r(e)$ заряда с заданными геометрическими параметрами и $\kappa(e)$ представлены на рисунке 2 и 3 соответственно.

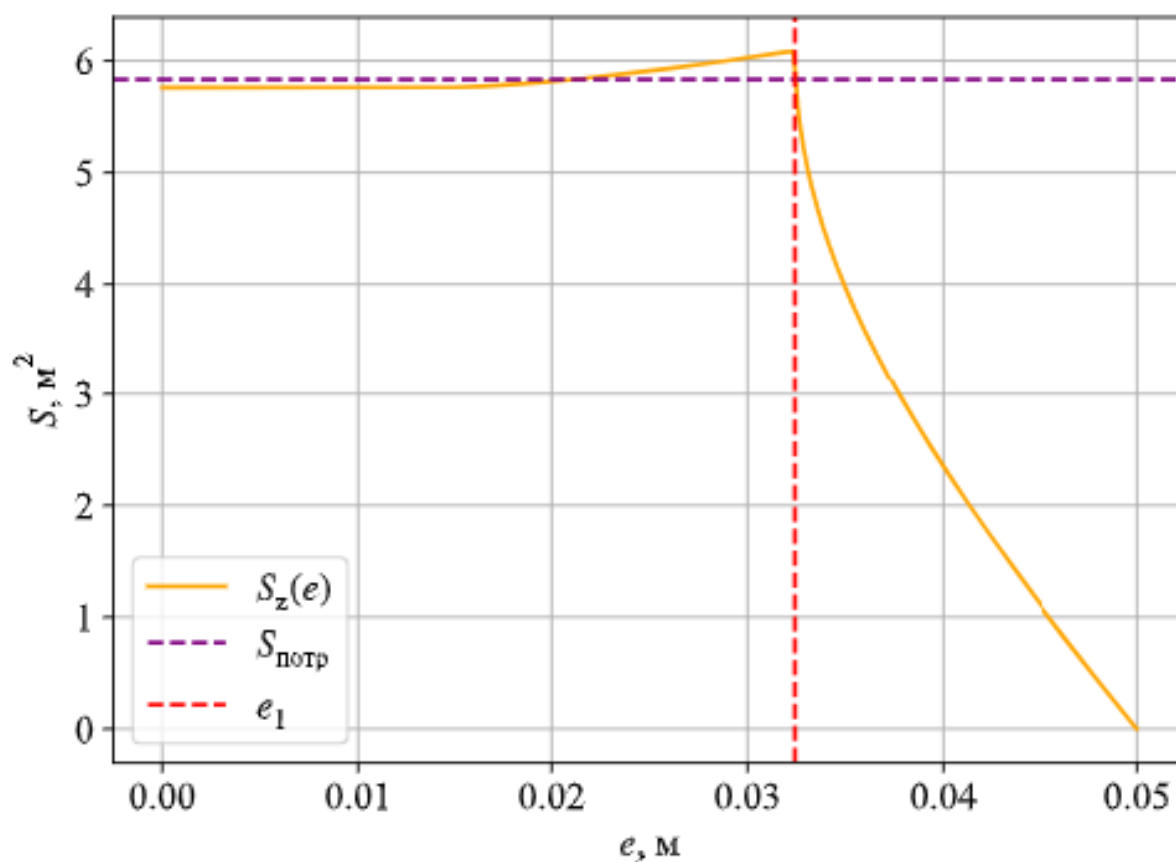


Рисунок 2. График изменения площади горения заряда

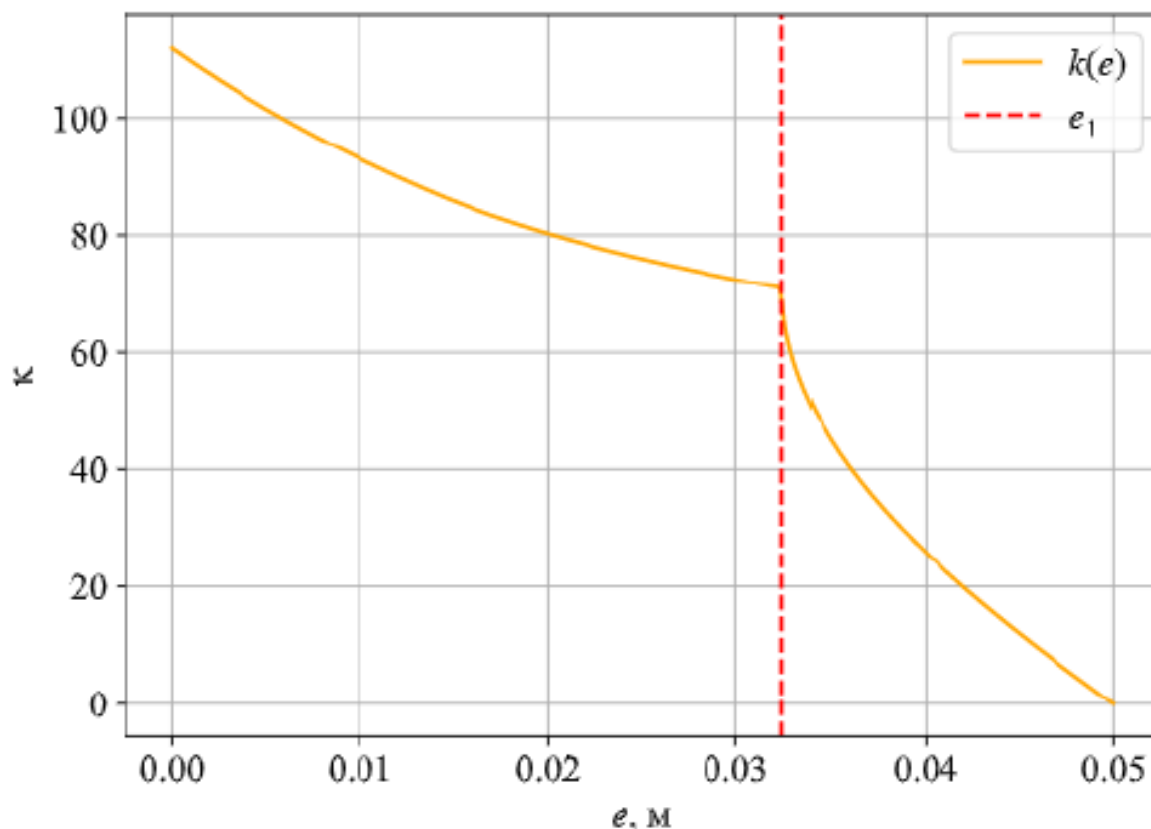


Рисунок 3. График изменения $k(e)$

Используемое топливо - 25% ПБАК, 75% ПХА. Параметры топлива представлены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры топлива

$\rho_t, \text{ кг/м}^3$	$R_t, \text{ Дж/кг} \cdot \text{ К}$	k	ν	$u_1, \text{ м/с}$	$T_0, \text{ К}$
1524	408,872	1,278	0,41	$2,45 \cdot 10^{-6}$	1789,24

Коэффициент тепловых потерь принят $\chi = 0,906$. Опорное давление в камере $p_k = 17,5$ МПа и принимается постоянным весь период работы двигателя. Первом приближении задается давление у переднего днища, большим опорного давления ($p_{д1} = 21,5$ МПа).

В расчетах приняты следующие индексы у параметров: д – переднее днище; к – выходное сечения заряда; кр – критическое сечение сопла; а – выходное сечение сопла.

Зададим вспомогательную функцию

$$\varphi(\lambda) = r(\lambda) + \lambda \frac{d}{d\lambda} r(\lambda).$$

Функция левой части уравнения неразрывности:

$$\Phi(\lambda) = \begin{cases} \int_0^{\lambda_{\text{пр}}} \frac{\varphi(\lambda) d\lambda}{r(\lambda)^v}, & \text{если } \lambda \leq \lambda_{\text{пр}}; \\ \int_{\lambda_{\text{пр}}}^{\lambda} \frac{\varphi(\lambda) d\lambda}{r(\lambda)^v [1 + k_{\lambda} (\lambda - \lambda_{\text{пр}})]} + \int_0^{\lambda_{\text{пр}}} \frac{\varphi(\lambda) d\lambda}{r(\lambda)^v} & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Функция правой части уравнения

$$\Phi_1(x, e) = \frac{\rho_{\text{т}} S_6(x, e) u_1}{p_{\text{дл}}^{1-v} F_{\text{к}}(e)} \sqrt{\frac{k+1}{2k} \chi R T_0},$$

где $S_6(x, e) = \Pi_{\text{г}}(e) \cdot x$ – площадь боковой поверхности канала; $\Pi_{\text{г}}(e)$ – периметр горения, определяемый геометрическим законом горения

$$\Pi_{\text{г}}(e) = \frac{S(e)}{L_{\text{зар}}}.$$

Зависимость безразмерной скорости потока по длине заряда и по толщине сгоревшего свода $\lambda_{\text{кан}}(x, e)$ определяется путем приравнивания левой и правой частей уравнений

$$\Phi(\lambda) = \Phi_1(x, e).$$

Зависимость $\lambda_{\text{кан}}(x, e)$ построена на рисунке 4 для $e = 0; 1/4 \cdot e_0; \dots e_0$.

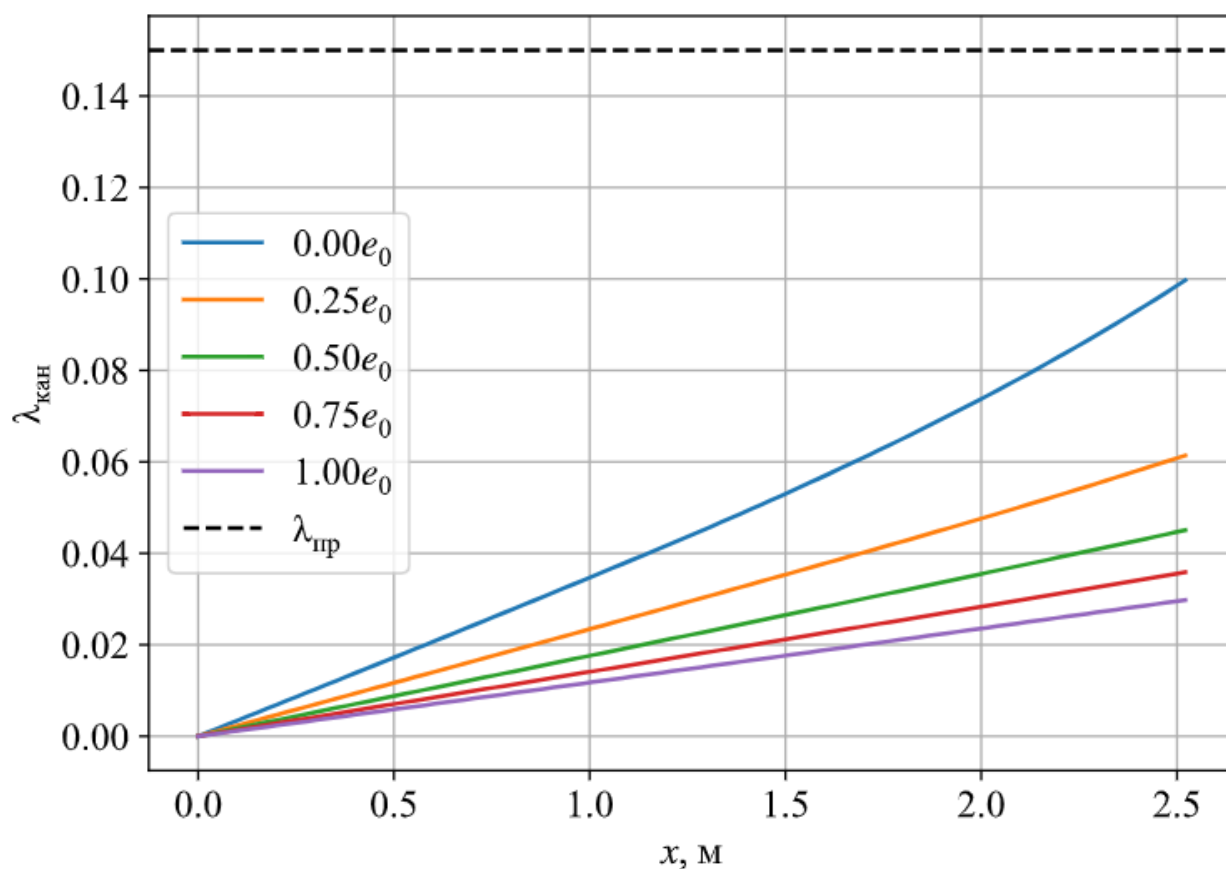


Рисунок 4. Распределение безразмерной скорости потока по длине заряда

Из Рисунок 4 видно, что безразмерная скорость потока увеличивается по длине заряда из-за подвода массы от поверхности горения заряда. По мере выгорания топлива, увеличивается проходное сечения заряда, поэтому скорость начинает падать. При этом скорость потока меньше порогового значения $\lambda_{пр} = 0,15$, что означает отсутствие эрозионного горения.

Распределение статического давления по длине канала в первом приближении может быть вычислено по формуле

$$p_I(x, e) = p_{дл} r(\lambda_{кан}(x, e)).$$

Графическое представление отражено на Рисунок 5

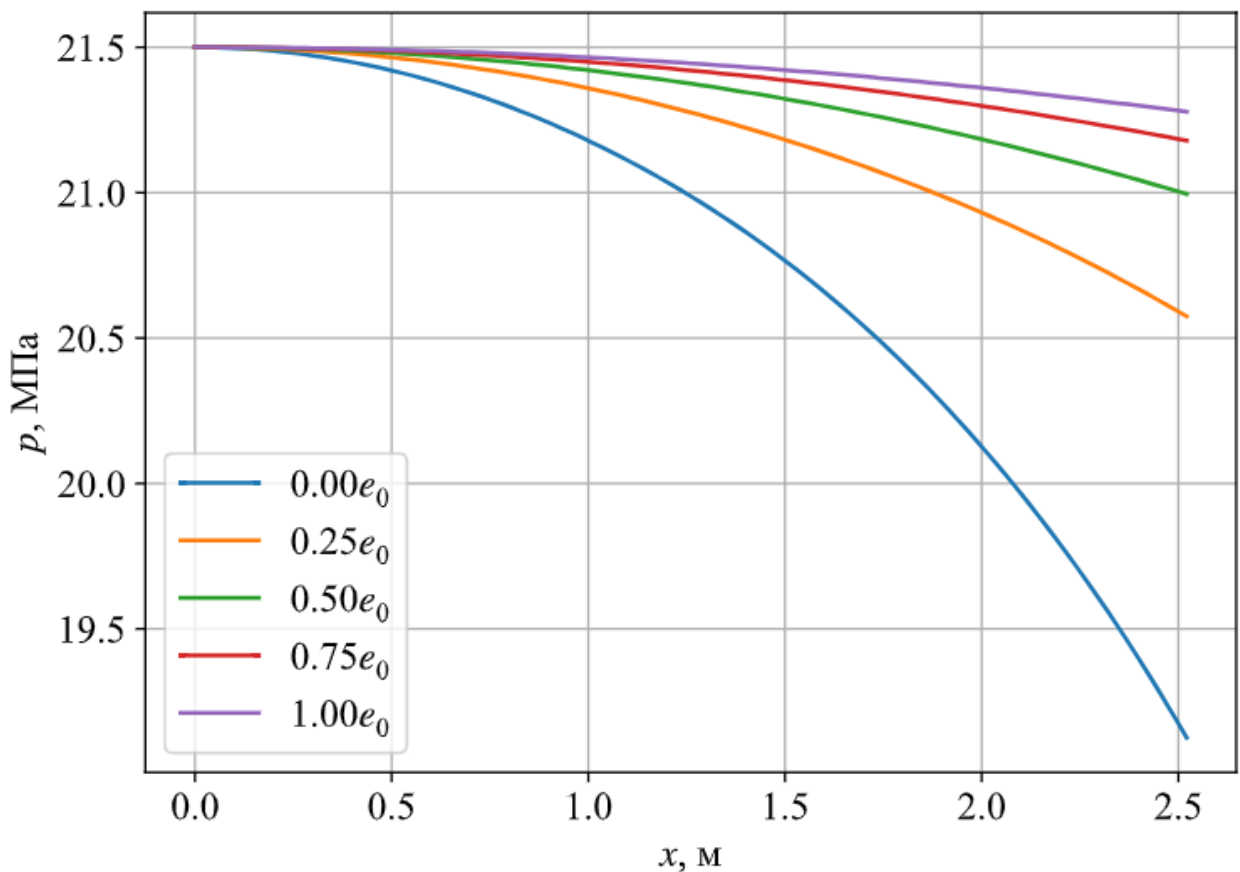


Рисунок 5. Распределение давления по длине заряда (первое приближение)

По мере увеличения скорости потока давление падает, принимая в выходном сечении различные значения, которые зависят от толщины горящего свода в данный момент времени. В нашем случае, постоянное давление в КС принято $p_k = 17,5$ МПа. Несоответствие давления в выходном сечении канала заданному свидетельствует о неверном выбранном давлении у переднего днища $p_{дл}$.

Кроме этого, значение p_d изменяется с течением времени. Поэтому вторым приближением будет подбор зависимости $p_d(e)$, обеспечивающей заданное значение давления в выходном сечении канала p_k .

Имея распределение давления по длине канала, можно определить давление на переднем днище, сместив каждый из графиков по оси абсцисс по левой границе в требуемую точку. Зависимость давления может быть найдена по формуле

$$p_{дп} = p_k + p_{д1} - p_1(L_{зар}, e).$$

Представленная выше формула должна быть подставлена в формулу

$$\Phi_1(x, e) = \frac{\rho_{\tau} S_6(x, e) u_1}{p_{дп}(e)^{1-\nu} F_k(e)} \sqrt{\frac{k+1}{2k}} \chi R T_0.$$

Решение повторяется с получением зависимостей $p(x)$ и $\lambda(x)$ до тех пор, пока значение давления в выходном сечении не станет равным $p_k = 17,5$ МПа с точностью до 100 Па. В конечном приближении распределение давления по длине заряда представлено на Рисунок 6.

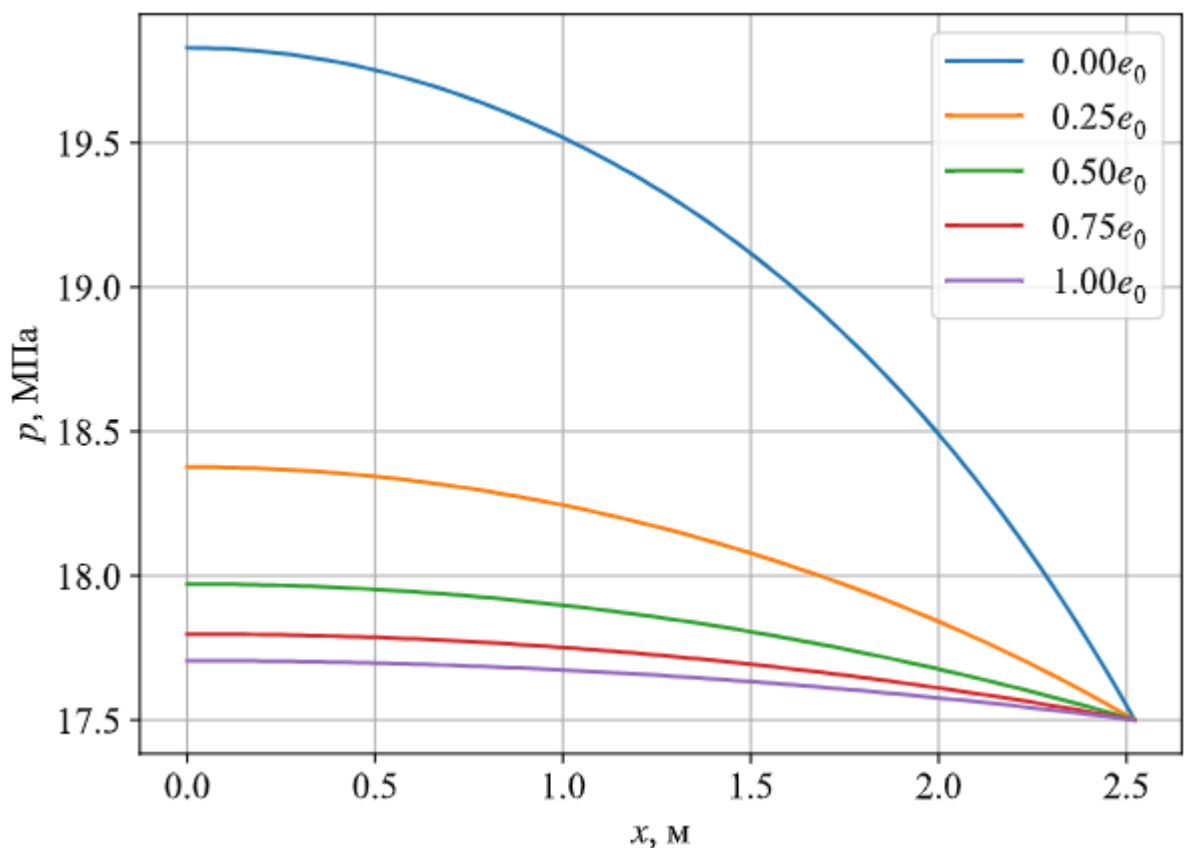


Рисунок 6. Распределение давления по длине заряда

Согласно рисунку 6 максимальное давление, действующее на переднее днище, равно $p_{д max} = 19,87$ МПа.

Используя уравнение состояния идеального газа, можно найти распределение плотности потока по длине заряда. Данное распределение представлено на Рисунок 7.

$$\rho(x, e) = \frac{p(x, e)}{R_r T_0}.$$

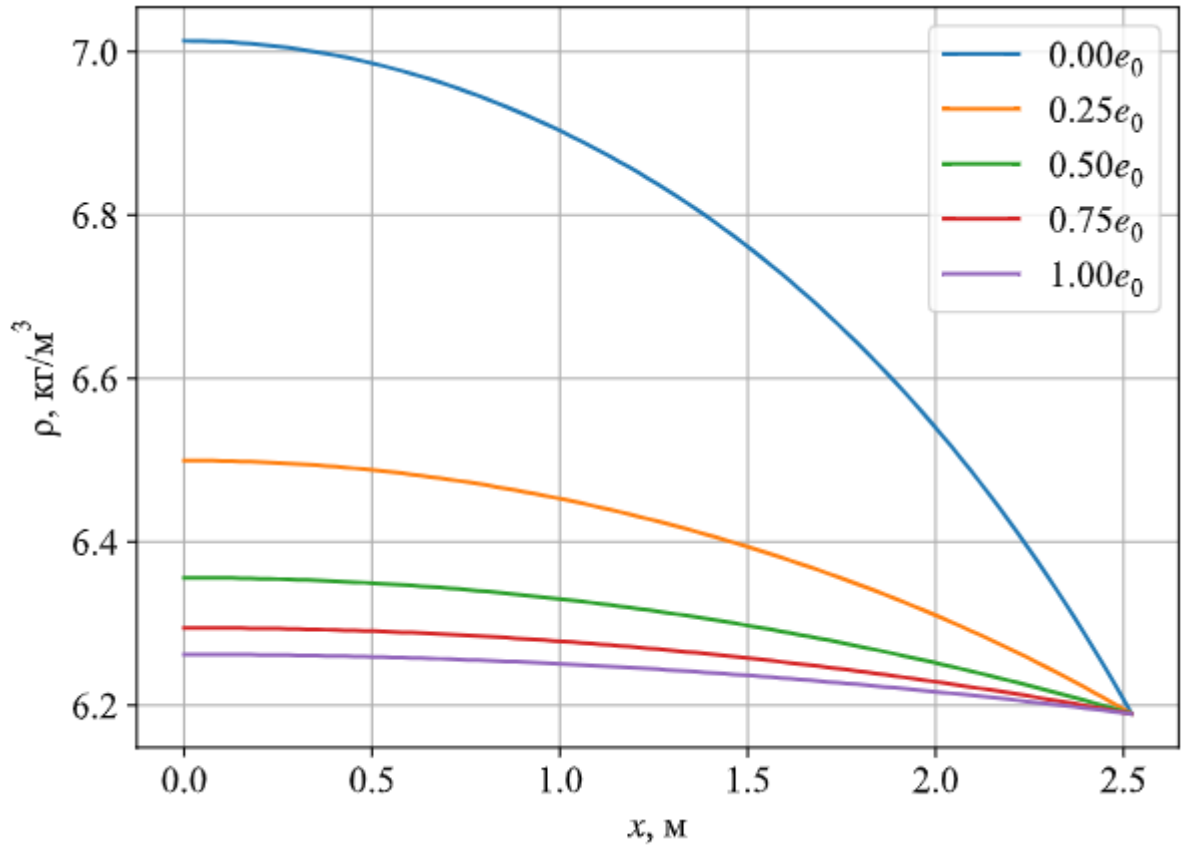


Рисунок 7. Распределение плотности по длине заряда

Изменение давления по длине канала приводит к изменению расчетного газоприхода и давления перед соплом. Для учета этого факта запишем функцию коэффициента K_u , который обозначает отношение средней по длине заряда скорости горения к скорости торцевого горения этого же топлива

$$K_u(e) = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \frac{y(\lambda_{\text{кан}}(L_{\text{зар}}, e)) \left[r(\lambda_{\text{кан}}(L_{\text{зар}}, e)) \right]^{1-\nu}}{\Phi(\lambda_{\text{кан}}(L_{\text{зар}}, e))},$$

где $y(\lambda)$ - газодинамическая функция.

Коэффициент восстановления полного давления в предсопловом объеме находится по формуле

$$\sigma_c = 1 - \xi \frac{k}{k+1} \pi(\lambda_{\text{кан}}(L_{\text{зар}}, e)) \lambda(\lambda_{\text{кан}}(L_{\text{зар}}, e))^2,$$

где ξ – коэффициент гидравлических потерь в предсопловом объеме, который определяется экспериментально или на основе численного расчета. Для данной задачи принято $\xi = 1,1$.

Давление в камере для случая одномерной модели (заряд бронированный прочноскрепленный) рассчитывается по формуле

$$p_{к2}(e) = \left[\frac{\rho_{\tau} u_1 S_6(L_{\text{зар}}, e) K_u \sqrt{\chi R T_0} \pi(\lambda_{\text{кан}}(L_{\text{зар}}, e))}{\mu_c A(k) F_{\text{кр}} \sigma_c(e)} \right]^{\frac{1}{1-\nu}},$$

где $\mu_c = 0,95$ – коэффициент расхода сопла.

График зависимости давления от толщины горящего свода приведен на Рисунок 8.

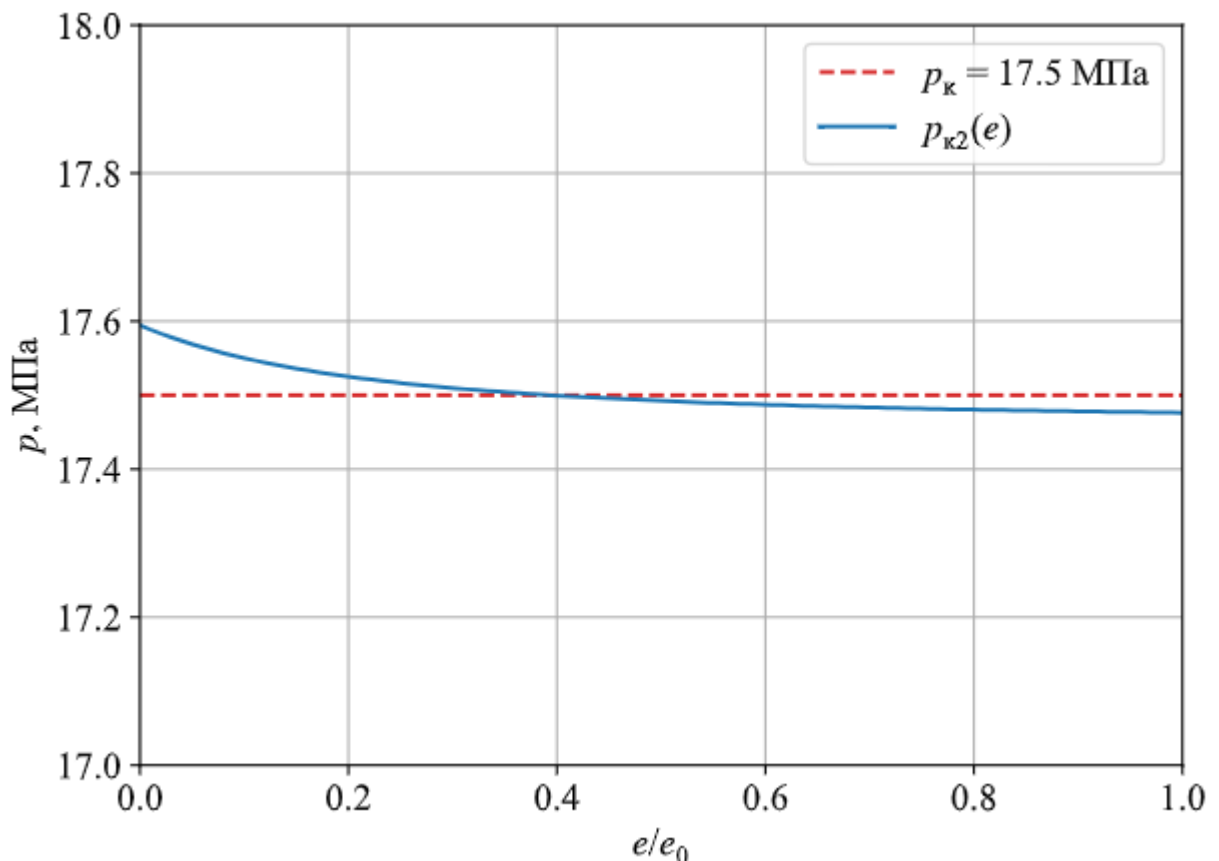


Рисунок 8. Изменение давления в камере от толщины горящего свода

Как видно из рисунка 8, даже при заданной постоянной площади горения в случае расчета по одномерной методике наблюдается отклонение от

номинального давления по мере выгорания заряда. Для построения графика площадь критического сечения подбиралась таким образом, чтобы обеспечить среднее давление в камере, равным номинальному на всем протяжении работы. Скорректированная площадь критического сечения $F_{кр} = 6,57 \cdot 10^{-4}$ м.

Для справки на Рисунок 9 приведены значения коэффициента восстановления полного давления σ_c и коэффициента K_u . Как видно из графика с течением времени за счет снижения скорости в выходном сечении сопла коэффициент σ_c растет и приближается к 1. Коэффициент K_u практически неизменен и приближенно равен 1, что говорит об отсутствии эрозионного горения.

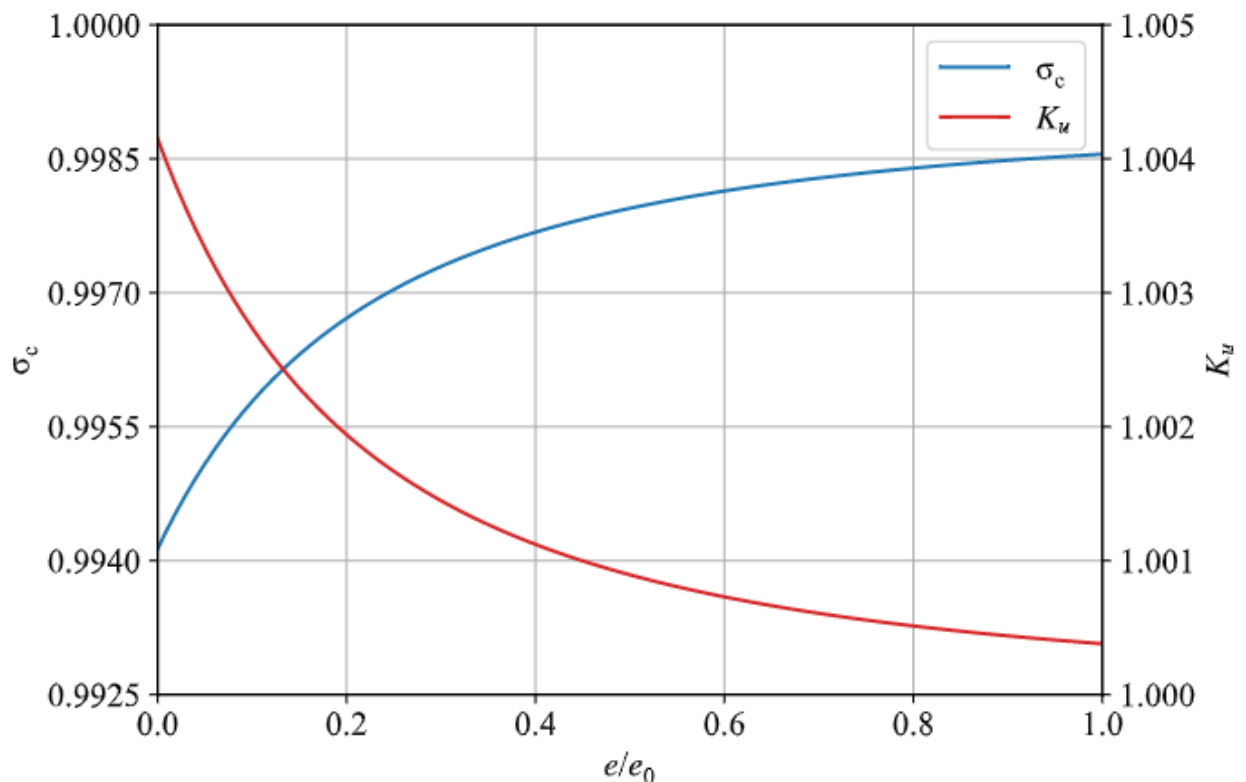


Рисунок 9. Изменение коэффициентов σ_c и K_u

Заключение

Таким образом, были проведены расчеты основных параметров потока, используя модель одномерного течения. Построено распределение безразмерной скорости потока по длине заряда (рис. 3). Выявлено, что безразмерная скорость потока увеличивается по длине заряда и уменьшается по мере выгорания топлива. При этом скорость потока оказалась меньше порогового значения $\lambda_{\text{пр}} = 0,15$, т.е. эрозионное горение отсутствует.

Произведено уточнение давления у переднего днища, выполнен повторный расчет распределения давления (рис. 6) и скорости потока. Определено максимальное давление, действующее на переднее днище $p_{d \max} = 19,87$ МПа. Найдено распределение плотности потока по длине заряда (рис. 7).

Найдена зависимость давления в камере от относительной толщины горящего свода (рис. 8). Выявлено, что в случае расчета по одномерной методике наблюдается отклонение от номинального давления по мере выгорания заряда. Построены зависимости коэффициентов σ_c и K_u от толщины горящего свода (рис. 9). Согласно рис. 9, коэффициент K_u приближенно равен 1, что говорит об отсутствии эрозионного горения, а коэффициент восстановления полного давления σ_c растет и стремится к 1 а счет снижения скорости в выходном сечении сопла.

Список использованной литературы

1. Федоров А. А. Курс лекций по проектированию энергетических установок ракетного оружия.