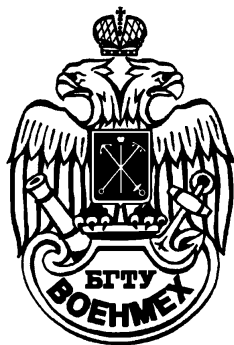


Балтийский государственный технический  
университет "Военмех" им. Д.Ф. Устинова

Факультет А "Ракетно-космической техники"

Кафедра А4 «Стартовые и технические комплексы ракет и  
космических аппаратов»



Расчетно-графическая работа

# Моделирование эжектируемого потока

Студент:

Готовцев А.Г А4М6102

Преподаватель:

Маштаков А.П.

23 января 2021 г.

# Оглавление

1	Введение	1
2	Расчетная модель	2
2.1	Описание . . . . .	2
2.2	Основные соотношения . . . . .	2
2.3	Потери на эжекцию . . . . .	3
2.4	Потери на местных сопротивлениях . . . . .	4
3	Результаты расчета	6
3.1	Исходные данные . . . . .	6
3.2	Изменения основных величин . . . . .	7
4	Заключение	9

## Принятые обозначения

$P_{\Pi}$	давление в приструйной зоне,	Па
$P_{\text{в}}$	внешнее давление,	Па
$h_{\text{э}}$	потери давления на эжекцию воздуха,	Па
$h_{\text{м}}$	потери давления на местных сопротивлениях,	Па
$v_{\text{э}}$	скорость эжектируемого воздуха	м/с
$\rho$	плотность воздуха	кг/м <sup>3</sup>
$h_{\text{с}}$	потери давления при сужении канала	Па
$h_{\text{р}}$	потери давления при расширении канала	Па
$h_{\Pi}$	потери давления при повороте канала	Па
$C_{\text{ст}}$	эжекционная способность струи	м <sup>2</sup> /с
$r_{\text{ст}}$	радиус границы струи	м
$m$	расход газа	м <sup>3</sup> /с
$Q_{\text{зв}}$	расход газа в звуковом сечении	м <sup>3</sup> /с
$x_{\text{зв}}$	осевая координата звукового сечения	м
$l$	скорость газа в звуковом сечении	м/с
$\varphi$	коэффициент потерь в сопле Лавалья 1	
$F_{\text{кр}}$	площадь критического сечения сопла	м <sup>2</sup>
$F_{\text{а}}$	площадь выходного сечения сопла	м <sup>2</sup>
$B$	коэффициент потерь в сопле Лавалья 2	
$P_0$	начальное давление в камере сгорания	Па
$P_{\text{а}}$	давление в выходном сечении сопла	Па
$R$	универсальная газовая постоянная	Дж/(моль К)
$T$	абсолютная температура торможения	К
$\Gamma$	показатель адиабаты	
$M$	число Маха	
$\eta$	???	

## Глава 1

# Введение

В работе рассматривается процесс эжекции воздуха из прилегающей к сверхзвуковой струе среды. Процесс истечения происходит в камеру ограниченного диаметра. В качестве результата работы необходимо определить закономерности изменения давления в следствие эжекции в приструйной зоне. При расчете необходимо учесть потери давления на эжекцию воздуха и потери на местные сопротивления в эжектируемом потоке в зазоре между стенками камеры.

## Глава 2

# Расчетная модель

## 2.1 Описание

Для расчета изменений давления в приструйной зоне во времени примем расчетный цикл. На каждой его итерации будем рассчитывать величину потерь на эжекцию воздуха и вычитать её из текущего значения давления. Тем самым будет получено новое значение давления в приструйной зоне, которое будет использовано в следующей итерации как текущее. Изменяющееся внешнее давление будет оказывать влияние на режим истечения струи и её эжектирующую способность, что также повлечет за собой изменение величины потерь.

## 2.2 Основные соотношения

Основным расчетным соотношением является формула

$$P_{\Pi} = P_{\text{в}} - h_{\text{э}} - h_{\text{м}}, \quad (2.2.1)$$

в которой отражены потери полного давления на эжекцию воздуха и потери давления на местных сопротивлениях. Полное давление приравнено к окружающему. Потери на эжекцию определяются следующим соотношением

$$h_{\text{э}} = \frac{\rho v_{\text{э}}^2}{2}. \quad (2.2.2)$$

Потери на потери давления на местных сопротивлениях определяются в соответствии с расчетной схемой, изображенной на рисунке 2.2.1

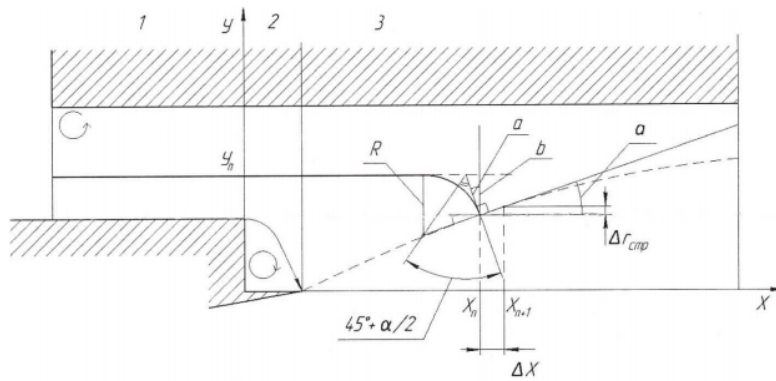


Рис. 2.2.1: Схема расчета потерь на местных сопротивлениях

По схеме, эти потери выражаются в трех составляющих - потерях на внезапное сужение канала, на участке 1, потерях на внезапное расширение канала, на участке 2, и поворот канала, на участке 3. Соответственно, имеем формулу

$$h_m = h_c + h_p + h_{\pi}. \quad (2.2.3)$$

Таким образом, имея ввиду расчетные соотношения 2.2.2, 2.2.3, требуется определить зависимости потерь от параметров течения струи.

## 2.3 Потери на эжекцию

В соответствии с формулой 2.2.2 для определения потерь на эжектирующем участке струи необходимо определить скорость эжектируемого потока для каждого сечения. Для этого воспользуемся соотношением

$$v_{\text{э}} = \frac{C_{\text{ст}}}{2\pi r_{\text{ст}}}. \quad (2.3.1)$$

Величина  $C_{\text{ст}}$  - эжекционная способность струи, принимается постоянной по её длине. Для определения введем формулу

$$C_{\text{ст}} = \frac{Q_{\text{эв}} - m}{x_{\text{эв}}}. \quad (2.3.2)$$

Формула для расхода

$$m = \varphi\left(\frac{F_{\text{кр}} B P_0}{\sqrt{RT}}\right), \quad (2.3.3)$$

где  $F_{\text{кр}}$  - площадь критического сечения сопла, определяемая как

$$F_{\text{кр}} = \frac{F_a}{\frac{1}{M^2} \left( \left( \frac{2}{\gamma+1} \right) \left( 1 + M^2 \frac{\gamma-1}{2} \right) \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, \quad (2.3.4)$$

а также  $B$  и  $\varphi$ , коэффициенты потерь в сопле Лаваля,

$$B = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}}, \quad (2.3.5)$$

$$\varphi = 0.98, \quad (2.3.6)$$

и начальное давление в камере сгорания

$$P_0 = P_a \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}. \quad (2.3.7)$$

Величины  $Q_{зв}$  и  $x_{зв}$  характеризуют звуковое сечение - такое, в котором скорость истечения газа равно скорости звука. Сначала определяется координата сечения на оси струи

$$x_{зв} = (13.28\sqrt{\gamma M^2} + 11.8)\sqrt[3]{\eta} - 23.57. \quad (2.3.8)$$

Затем, по данным расчета геометрии струи определяется радиус этого сечения. С его помощью определяем расход через звуковое сечение

$$Q_{зв} = 0.217\pi l r_{ст.зв}^2, \quad (2.3.9)$$

где, соответственно

$$l = \sqrt{\frac{\gamma}{RT}} P_0 \sqrt{\frac{\gamma + 1}{2}}. \quad (2.3.10)$$

Таким образом, имеем все необходимые соотношения для определения величины потерь на эжекцию воздуха по формуле 2.2.2.

## 2.4 Потери на местных сопротивлениях

Из формулы местных потерь 2.2.3 имеем потери при внезапном сужении канала, выраженные формулой

$$h_c = \zeta_c \frac{v_{12}^2}{2g}, \quad (2.4.1)$$

потери при внезапном расширении канала, выраженные формулой

$$h_{рв} = \zeta_p \frac{v_{23}^2}{2g}, \quad (2.4.2)$$

и, потери при повороте, выраженные формулой

$$h_{пв} = \zeta_{\pi} \frac{v_{23ср}^2}{2g}. \quad (2.4.3)$$

Коэффициент потерь при внезапном сужении постоянен и равен

$$\zeta_c = 0.5 \quad (2.4.4)$$

потерь при внезапном расширении определяется перепадом сечений и равен

$$\zeta_p = (1 - \frac{S_2}{S_3})^2. \quad (2.4.5)$$

Коэффициент потерь при повороте канала определяется углом поворота

$$\zeta_{\pi} = 0.95(\sin(\frac{\alpha}{2}))^2 + 2.05(\sin(\frac{\alpha}{2}))^4. \quad (2.4.6)$$

Для определения этого угла используем схему на рис. 2.2.1. По длине струи делим её на конечные участки и определяем на этих участках разницу в радиусе границы. После чего, определяем угол через арктангенс

$$\alpha = \arctan(\frac{\Delta r_{\text{ст}}}{\Delta x_{\text{ст}}}). \quad (2.4.7)$$

Скорости газа на всех участках определяются из закона постоянства расхода.



## Глава 3

# Результаты расчета

### 3.1 Исходные данные

$P_{\text{в}} = 10^5$  Па - внешнее давление в начальный момент времени

$\rho = 1.2041$  кг/м<sup>3</sup> - плотность воздуха

$F_{\text{а}} = 0.5$  м<sup>2</sup> - площадь выходного сечения сопла

$P_{\text{а}} = 0.8 \cdot 10^5$  Па - давление в выходном сечении сопла в начальный момент времени

$R = 287$  Дж/(моль К) - универсальная газовая постоянная

$T = 293$  К - температура торможения

$\Gamma = 1.4$  - показатель адиабаты

$M = 3$  - число Маха

$d_{\text{а}} = 0.8$  м - диаметр выходного сечения сопла

$d_{\text{к}} = 1$  м - диаметр кормы

$d_{\text{тр}} = 1.2$  м - диаметр трубы

$\alpha = 10^\circ$  - угол полураствора сопла

$x = 10$  м - длина эжектирующего участка

## 3.2 Изменения основных величин

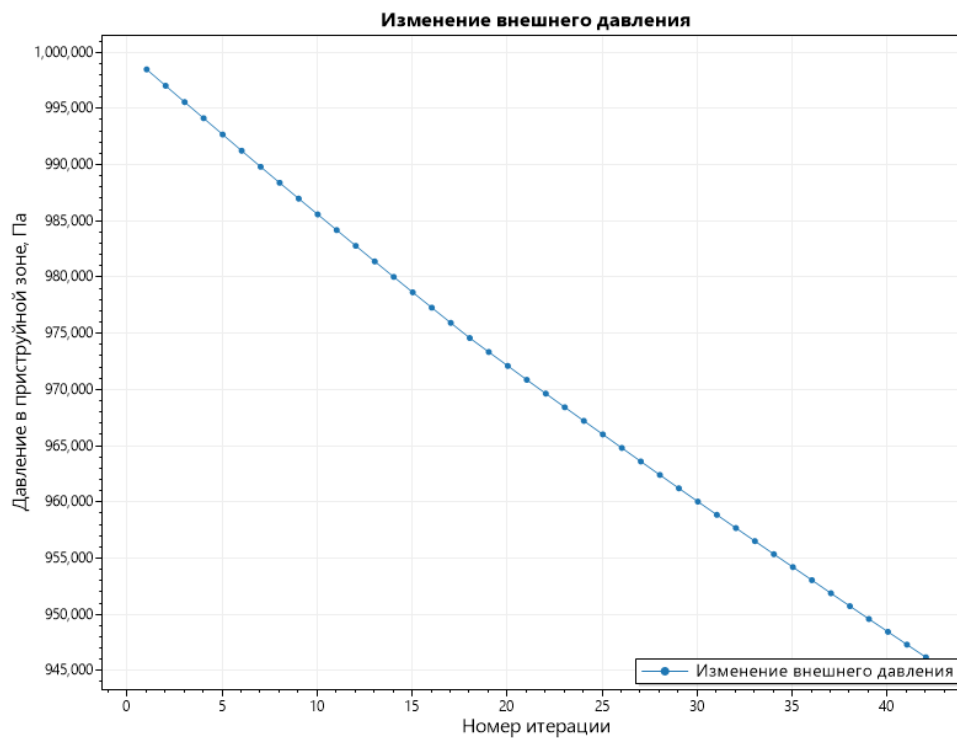


Рис. 3.2.1: Изменение давления в приструйной зоне

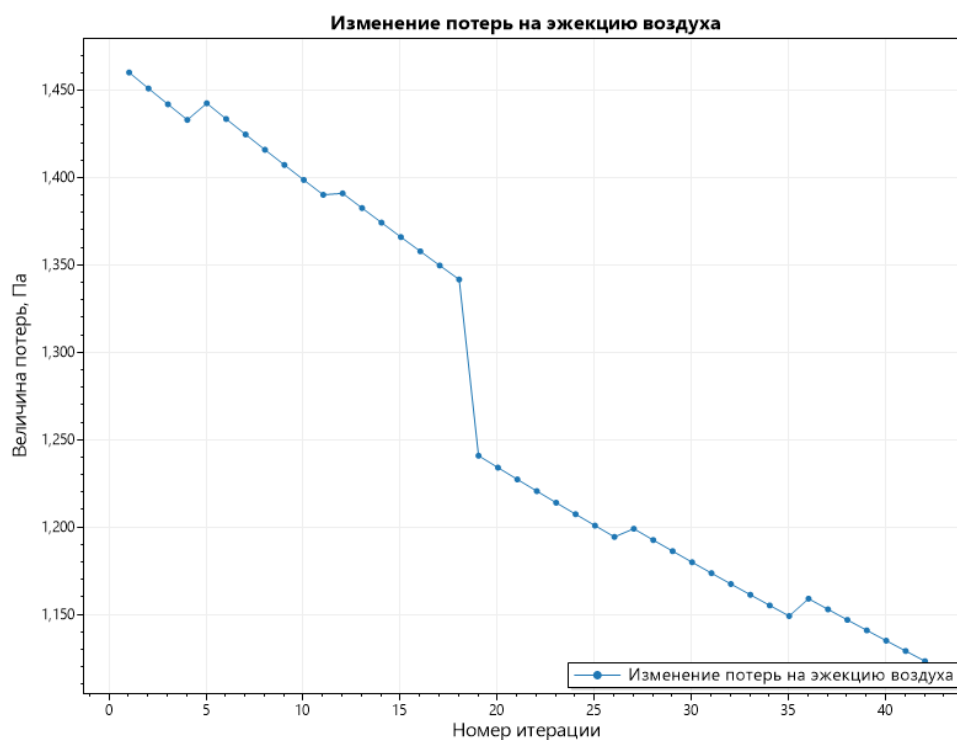


Рис. 3.2.2: Изменение потерь на эжекцию приструйного воздуха

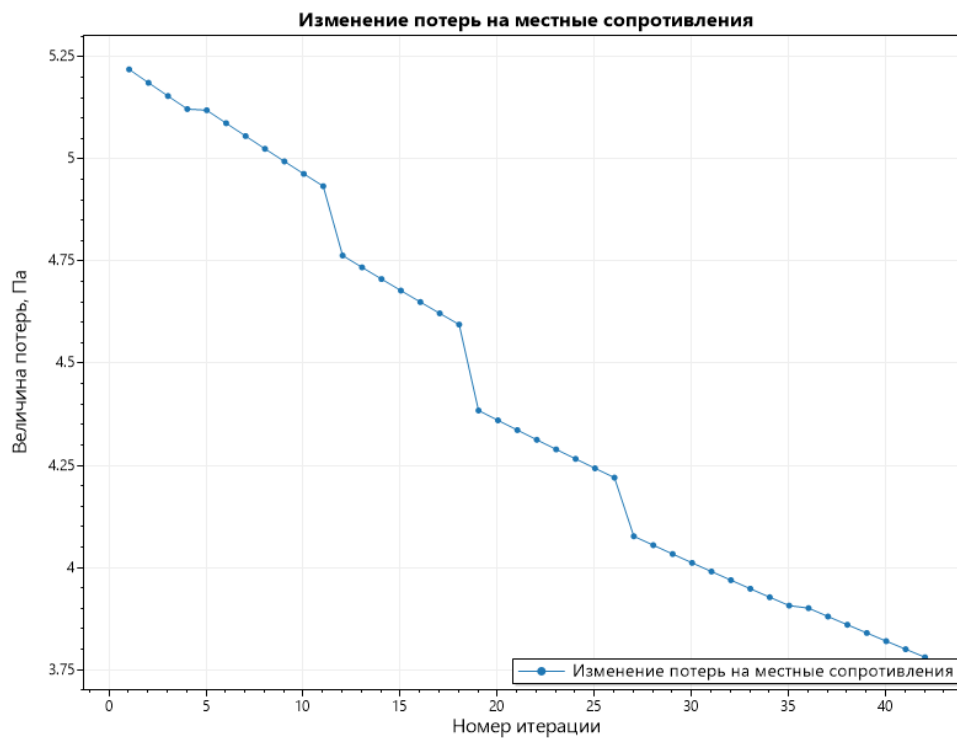


Рис. 3.2.3: Изменение потерь на местных сопротивлениях в зазоре

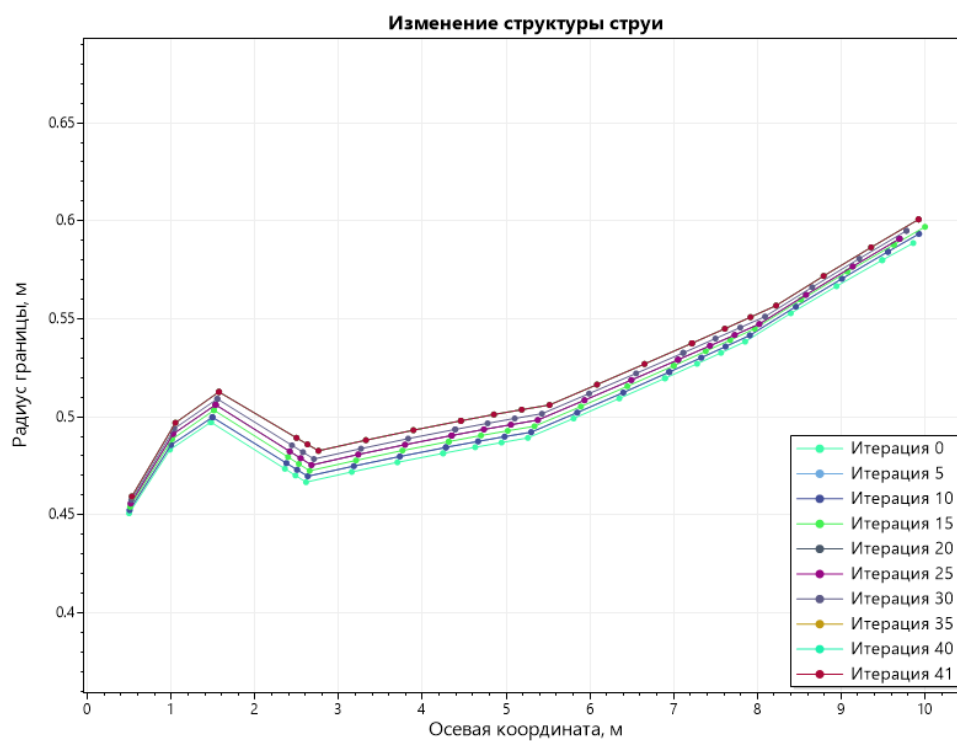


Рис. 3.2.4: Изменение структуры струи

## Глава 4

# Заключение

В процессе выполнения работы по представленной математической модели был выполнен итерационный расчет. На каждой итерации производился расчет геометрии струи, скорости эжектируемого воздуха и потерь. Изменения внешнего давления в приструйной зоне, возникающие в следствие эжекции, учитывались при каждой последующей итерации расчета. В момент, когда границы струи достигли стенок камеры, была также пересчитана площадь эжектирующего участка. После этого, было произведено еще 6 итераций.

В результате выполнения расчета выявлены зависимости, представленные графически в главе 3. Из них видно, что давление в приструйной зоне линейно падает (рис. 3.2.1) в пределах от 1 до 0.94 ата. Данное обстоятельство приводит к расширению границ струи в среднем на 0.02 м по всех длине (рис. 3.2.4) и последующему их пересечению со стенками камеры.