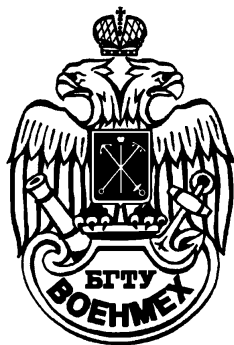


Балтийский государственный технический
университет "Военмех" им. Д.Ф. Устинова

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.

24 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_{Π}	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
ρ	плотность воздуха	кг/м ³
$h_{\text{с}}$	потери давления при сужении канала	Па
$h_{\text{р}}$	потери давления при расширении канала	Па
h_{Π}	потери давления при повороте канала	Па
$C_{\text{ст}}$	эжекционная способность струи	м ² /с
$r_{\text{ст}}$	радиус границы струи	м
m	расход газа	м ³ /с
$Q_{\text{зв}}$	расход газа в звуковом сечении	м ³ /с
$x_{\text{зв}}$	осевая координата звукового сечения	м
l	скорость газа в звуковом сечении	м/с
φ	коэффициент потерь в сопле Лавалья 1	
$F_{\text{кр}}$	площадь критического сечения сопла	м ²
$F_{\text{а}}$	площадь выходного сечения сопла	м ²
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
Γ	показатель адиабаты	
M	число Маха	
η	???	

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

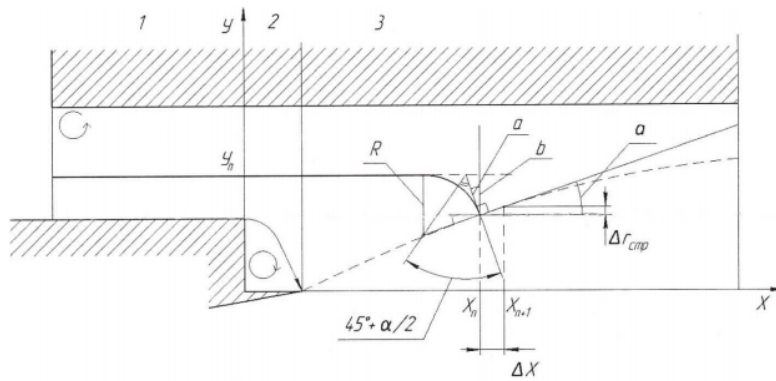


Рис. 2.2.1: Схема расчета потерь на местных сопротивлениях

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 φ , 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/м³ - плотность воздуха

$F_{\text{а}} = 0.5$ м² - 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

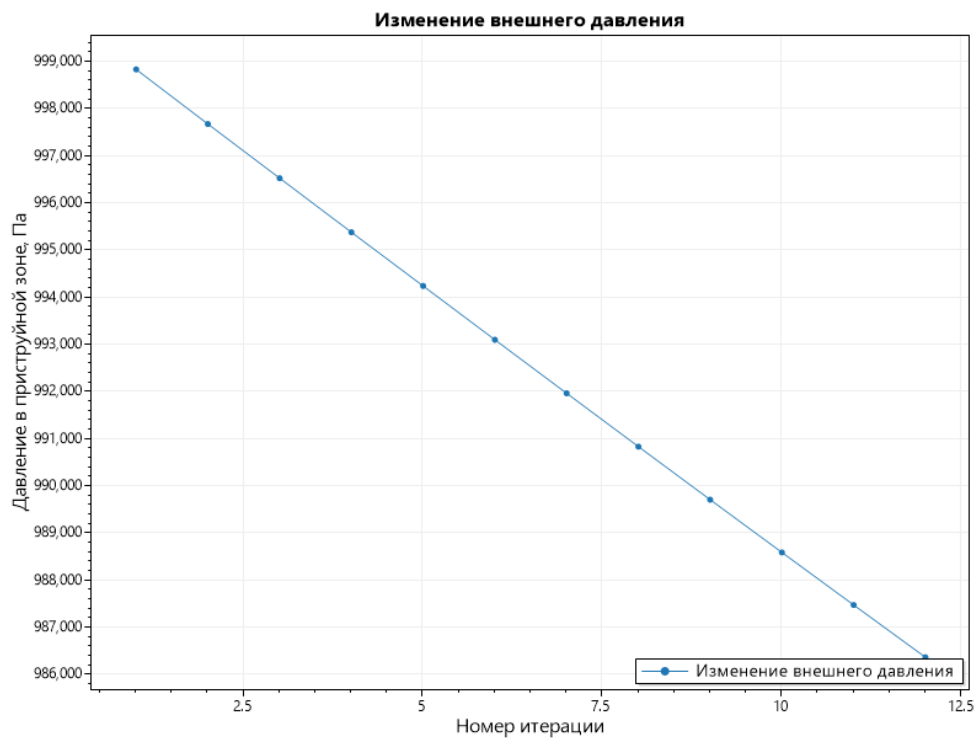


Рис. 3.2.1: Изменение давления в приструйной зоне

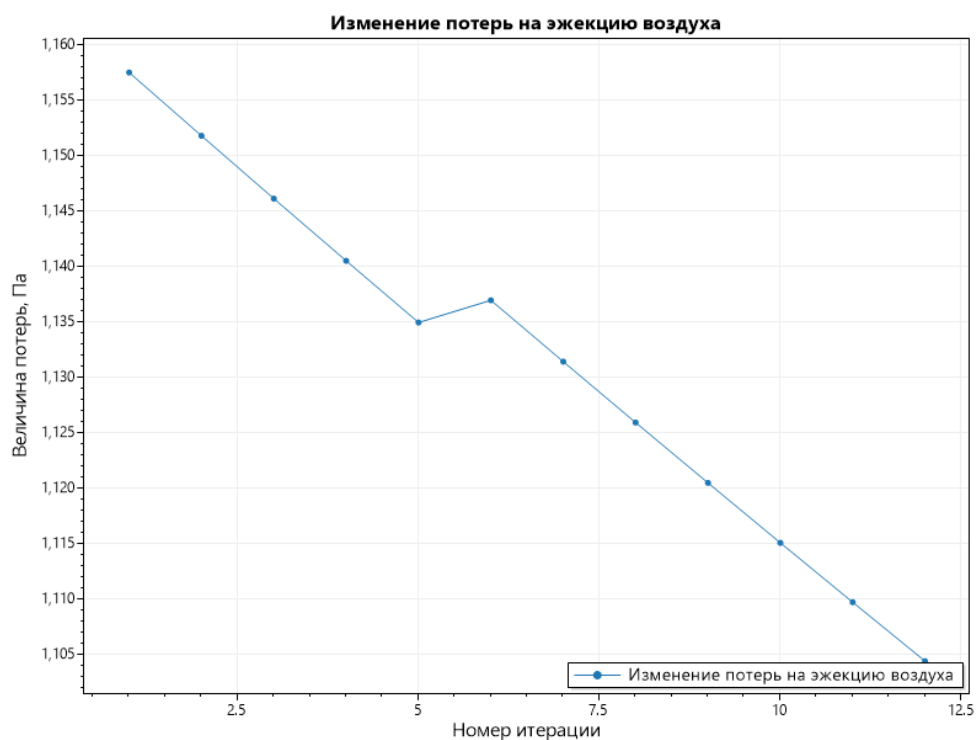


Рис. 3.2.2: Изменение потерь на эжекцию приструйного воздуха

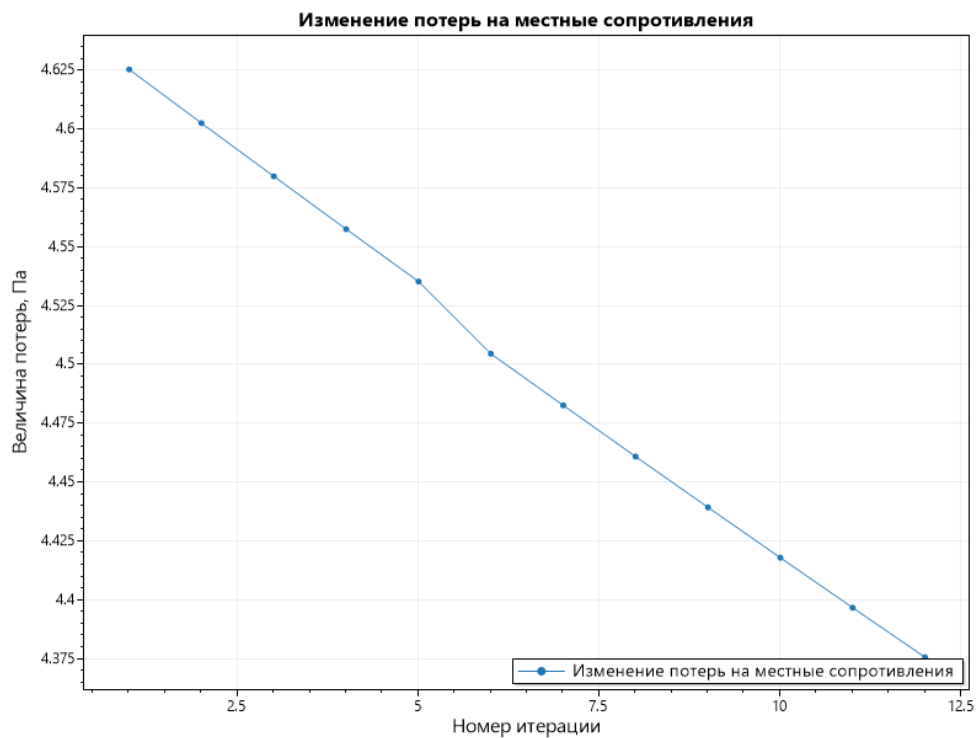


Рис. 3.2.3: Изменение потерь на местных сопротивлениях в зазоре

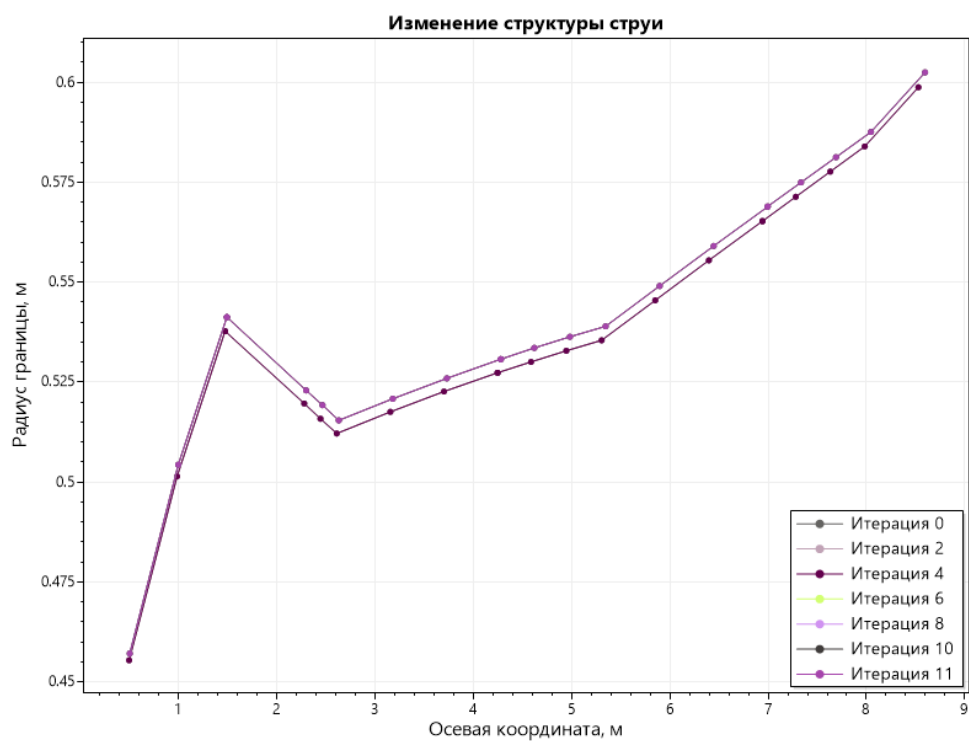


Рис. 3.2.4: Изменение структуры струи

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 (6 итерация), 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 998,2 кПа до 986,4 кПа. Данное обстоятельство приводит к расширению границ струи в среднем на 0.005 м по всех длине (рис. 3.2.4) и последующему их пересечению со стенками камеры.