



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» (СМ)

КАФЕДРА «Ракетные и импульсные системы» (СМ-6)

## ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

по дисциплине: «Газовая динамика»

на тему: «Расчет одномерных стационарных течений газа в  
соплах»

Вариант №777

Выполнил: студент группы СМ6-42

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

В.В. Петров

Проверил:

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

В.А. Федулов

Москва, 2024 г.

## Задание

Для заданных параметров газа в камере (полное давление  $\rho_0$ , полная температура  $T_0$ , индивидуальная газовая постоянная  $R_0$ , показатель адиабаты  $k$ ) и геометрии сопла (диаметр камеры  $D_k$ , диаметр критического сечения  $d_*$ , углы  $\alpha$  и  $\beta$ ) решить следующие задачи.

1. По заданным геометрическим параметрам построить геометрию сопла Лавала и график зависимости площади поперечного сечения сопла от координаты.
2. Определить газодинамические характеристики течения в сопле.
  - 2.1. Найти распределение числа Маха и скоростной коэффициент  $\lambda$  по координатам с использованием численных методов для решения нелинейных уравнений. Для этого как в дозвуковой, так и сверхзвуковой части нужно взять не менее 50 расчетных точек.
  - 2.2. Найти распределение всех газодинамических параметров (скорости течения газа, давления, температуры, плотности) по длине сопла и построить соответствующие графики. Проанализировать и объяснить изменение всех газодинамических величин по длине сопла.
  - 2.3. Проанализировать и объяснить поведение расхода, приходящегося на единицу площади поперечного сечения, по длине сопла.
  - 2.4. Построить график массового расхода  $G$  по длине сопла и сделать соответствующие выводы.
3. Рассчитать силовые характеристики сопла.
  - 3.1. При внешнем давлении равном атмосферному ( $\rho_n = 10^5$  Па), вычислить тягу и удельную тягу.
  - 3.2. Определить степень нерасчетности сопла при заданных геометрических параметрах. Рассчитать потребную длину сопла, при которой оно работает на расчетном режиме.
  - 3.3. Рассчитать тягу сопла в вакууме и удельную тягу в вакууме. Определить идеальную скорость ракеты по формуле Циолковского при заданном отношении массы топлива к массе ракеты.

#### 4. Сформулировать соответствующие выводы.

В таблице 1 приведены исходные данные для расчета. В коде ссылка на таблицу выглядит так:

В таблице~\ref{table:initial\_data}  
приведены исходные данные для расчета.

Таблица 1. Исходные данные

| $\rho_0$ , МПа | $T_0$ , К | $R$ , Дж/(кг·К) | $k$  | $d_*$ , см | $\nu_B$ , м/с | $D_K$    | $\alpha$     | $\beta$      | $\mu_T$ |
|----------------|-----------|-----------------|------|------------|---------------|----------|--------------|--------------|---------|
| 5.5            | 2557      | 339             | 1.27 | 53.1       | 8.2           | $1.9d_*$ | $43.9^\circ$ | $11.6^\circ$ | 0.67    |

Вот как эта таблица выглядит в исходном файле:

```
\begin{table}[h]
% Название таблицы
\caption{Исходные данные}
% Метка для ссылки
\label{table:initial_data}
% Выравнивание таблицы
\centering
% Перерасчёт ширины таблицы
\resizebox{\textwidth}{!}
{
% Сама таблица
\begin{tabular}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|}
\hline
 $\rho_{0}$ , МПа &
 $T_{0}$ , К &
 $R$ , Дж/(кг $\cdot$ К) &
 $k$  &
 $d_{*}$ , см &
 $\nu_{B}$ , м/с &
 $D_{K}$  &
 $\alpha$  &
 $\beta$  &
 $\mu_{T}$  \text{[3mm]} \\
\hline
5.5 &
2557 &
339 &
1.27 &

```

```

53.1 &
8.2 &
1.9$d_{*}$ &
43.9\degree &
11.6\degree &
0.67 \\
\hline
\end{tabular}
}
\end{table}

```

## Методика решения

### Осваиваем формулы

Пример встроенной в строку формулы  $ax^2 + bx + c = f(x)$ . Пишется так:

Пример встроенной в строку формулы  $a x^2 + b x + c = f(x)$ .

Центрированная формула без номера пишется так:

```

\[
d_{\text{B}} =
d_{*} \sqrt{\nu_{\text{B}}} =
53.1 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{8.2} = 1.532 \text{ м}.
\]

```

А отображается так:

$$d_{\text{B}} = d_{*} \sqrt{\nu_{\text{B}}} = 53.1 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{8.2} = 1.532 \text{ м}.$$

Тоже формула без номера:

```

\begin{equation*}
x_{*} =
\frac{D_{\text{к}} - d_{*}}{2 \tan \alpha} =
\frac{1.9 d_{*} - d_{*}}{2 \tan \alpha} =
\frac{0.9 \cdot 53.1 \cdot 10^{-2}}{2} =
0.248 \text{ м}.
\end{equation*}

```

$$x_* = \frac{D_K - d_*}{2 \tan \alpha} = \frac{1.9d_* - d_*}{2 \tan \alpha} = \frac{0.9 \cdot 53.1 \cdot 10^{-2}}{2} = 0.248 \text{ м.}$$

Не забывайте, что формулы — это обычные члены предложения, поэтому на них распространяются все известные вам правила пунктуации.

Формула с номером и *меткой* (*label*) для ссылки на неё: записывается так:

```
\begin{equation}
d(x) = \begin{cases}
D_K - (D_K - d_*) \frac{x}{x_*}, & 0 < x \leq x_*, \\
d_* + (d_B - d_*) \frac{x - x_*}{x_B - x_*}, & x > x_*.
\end{cases}
\end{equation}
\label{eq:diameter}
```

а отображается так:

$$d(x) = \begin{cases} D_K - (D_K - d_*) \frac{x}{x_*}, & 0 < x \leq x_*, \\ d_* + (d_B - d_*) \frac{x - x_*}{x_B - x_*}, & x > x_*. \end{cases} \quad (1)$$

Сослаться на уравнение можно с помощью команды `ref`. Например, строка в `tex`-файле

В уравнении (`\ref{eq:diameter}`) происходят странности...

отобразится в «В уравнении (1) происходят странности...». То есть ссылка с помощью всё той же команды `ref`.

## Осваиваем рисунки

Рассмотрим только вставку нумерованного и именованного рисунка, поскольку другие случаи в технических отчётах редки.

Чтобы вставить рисунок с подписью нужно сделать следующее:

```
\begin{figure}[h]
\centering
\includegraphics[width=0.4\textwidth]{fig_example.png}
% Подпись
\caption{Некоторый график}
```

```
% Метка для ссылки на рисунок
\label{fig:some_plot}
\end{figure}
```

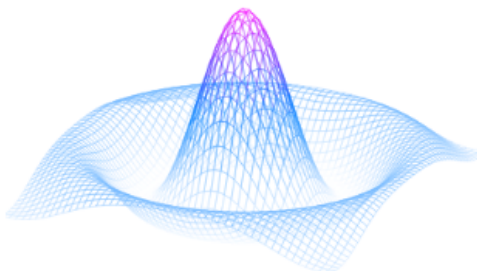


Рис. 1. Некоторый график

Здесь важно помнить, что в преамбуле у нас есть фраза

```
\graphicspath{{\subfix{../images/}}}
```

задающая папку, в которой хранятся картинки. Поэтому мы можем указывать в `includegraphics` только имя файла.

Сослаться всё так же просто. Вот пример:

На рисунке~\ref{fig:some\_plot} изображена функция „сомбреро”.

Отображается как: «На рисунке 1 изображена функция „сомбреро”.»

**Помните о том, что перекрёстные ссылки требуют двух компиляций.**

**И не забывайте про неразрывные пробелы. Номера рисунков, таблиц и формул не должны стоять в начале строки без упоминания перед ними, что именно означает цифра.**

Пример вставки двух рисунков в одной строке с разными подписями:

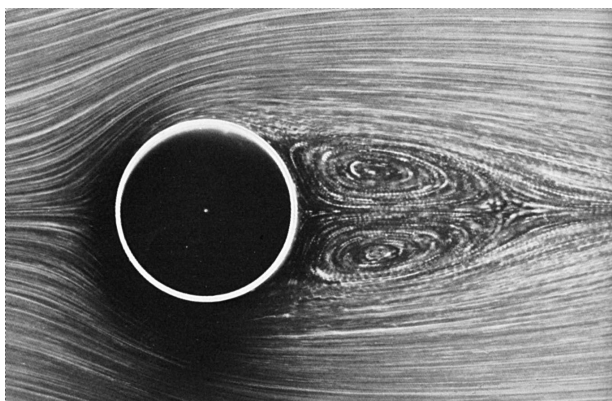


Рис. 2. Обтекание цилиндра

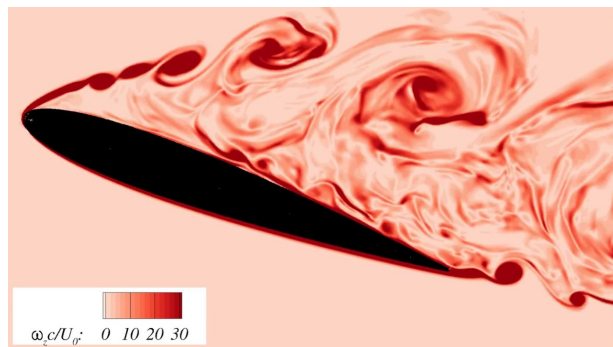


Рис. 3. Обтекание профиля крыла

В исходнике рисунки 4а и 3 выглядят так:

Пример вставки двух рисунков в одной строке с разными подписями:

```
\noindent
\begin{minipage}[t]{.5\textwidth}
  \centering
  \includegraphics[width=0.95\linewidth]{gd_cylinder.png}
  \captionof{figure}{Обтекание цилиндра}
  \label{fig:cylinder}
\end{minipage}
%
\begin{minipage}[t]{.5\textwidth}
  \centering
  \includegraphics[width=0.95\linewidth]{airfoil.png}
  \captionof{figure}{Обтекание профиля крыла}
  \label{fig:airfoil}
\end{minipage}
```

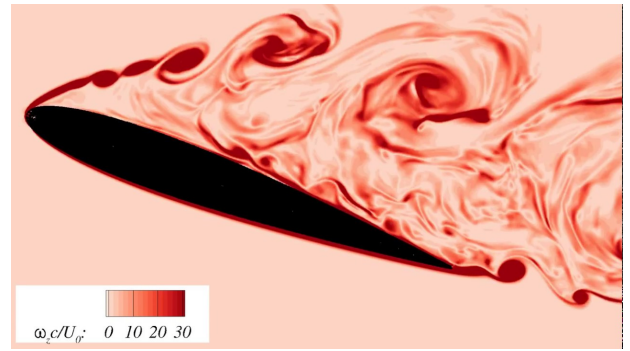
Если нужно, чтобы рисунки имели общую подпись и собственное буквенное обозначение, то это можно сделать так:

```
\begin{figure}
  \centering
  \begin{subfigure}[b]{0.5\textwidth}
    \includegraphics[width=0.95\textwidth]{gd_cylinder.png}
    \caption{цилиндр}
    \label{fig:a_cylinder}
  \end{subfigure}%
  \begin{subfigure}[b]{0.5\textwidth}
    \includegraphics[width=0.95\textwidth]{airfoil.png}
    \caption{профиль крыла}
    \label{fig:subfigure2}
  \end{subfigure}
  \caption{Обтекание различных тел}
  \label{fig:aerodynamics}
\end{figure}
```

Это даёт рис. 4.



а) цилиндр



б) профиль крыла

Рис. 4. Обтекание различных тел

## Результаты решения

В результате проделанной работы выполнен расчет геометрических, газодинамических и силовых характеристик сопла Лавалья. Результаты расчетов геометрических характеристик сопла:

1. Диаметр выходного сечения  $d_v = 1.532$  м,
2. Длина конфузора  $x_* = 0.248$  м,
3. Длина сопла  $x_v = 2.689$  м.

Таким образом, оформить документ в L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X — лишь дело опыта (как и в Word).



## Приложение

Приложение содержит исходный код компьютерной программы решения домашнего задания. Программа написана на языке программирования Python 3.

```
1 import numpy as np
2
3
4 def some_function(a, b):
5     c = np.sqrt(a*b + 1)
6     return c/a + b
7
8
9 result = some_function(4, 7)
10 with open("some_file.txt", "w") as f:
11     f.write(f"Some_result:_{result}")
```