

**Кафедра динамики и управления полётом летательных аппаратов**



**Дисциплина: Гидрогазоаэродинамика**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3**  
**«ТЕЧЕНИЕ ГАЗА ПО СОЛПУ ЛАВАЛЯ»**

Выполнил студент                      Топольницкий А.А.

Группа А183

Преподаватель                      Горохова П.Д.

Подпись преподавателя

Дата

Защита		
--------	--	--

Санкт-Петербург

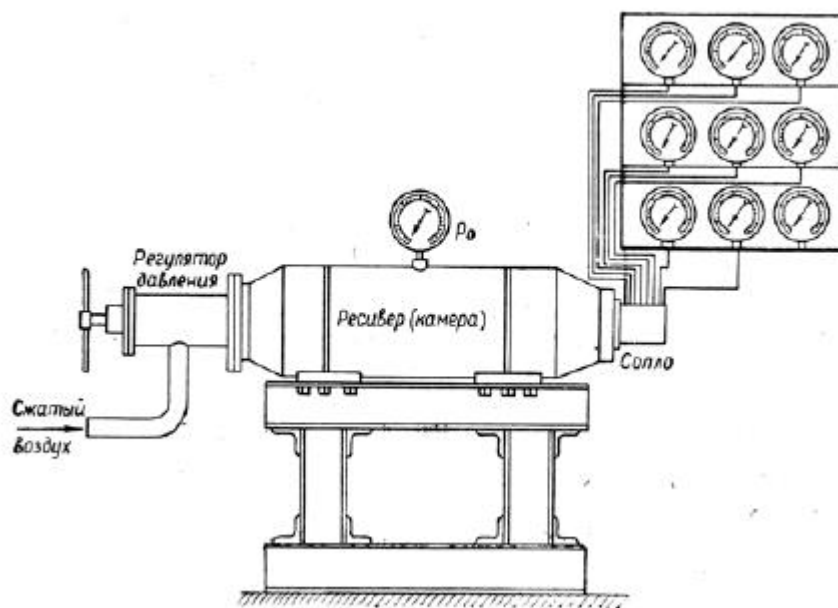
2020 г.

**Цель работы** – изучить изменение параметров газового потока в после Лавали, а именно: измерить распределение давления вдоль стенки сопла, рассчитать изменение основных параметров течения и сравнить полученные экспериментальные результаты с результатом теоретического расчёта.

### **Схема установки:**

Сопло Лавали – насадок с переменной площадью поперечного сечения: сужающаяся часть сопла – конфузор, расширяющаяся – диффузор. Практическое значение сопла Лавали определяется возможностью создания сверхзвуковой скорости истечения и, как следствие этого, высокого значения реактивной силы.

Испытуемое сопло соединяется с ресивером (камерой), в котором поддерживается постоянное давление  $p_0$ . Необходимая величина давления обеспечивается соответствующей подачей воздуха в ресивер. Количество подаваемого воздуха можно изменить с помощью регулятора давления, соответственно увеличивается или уменьшается величина давления. Для измерения статического давления вдоль стенки сопла сделаны приемные отверстия, смонтированные на специальном щите.



*Рисунок 1. Лабораторная установка с соплом*

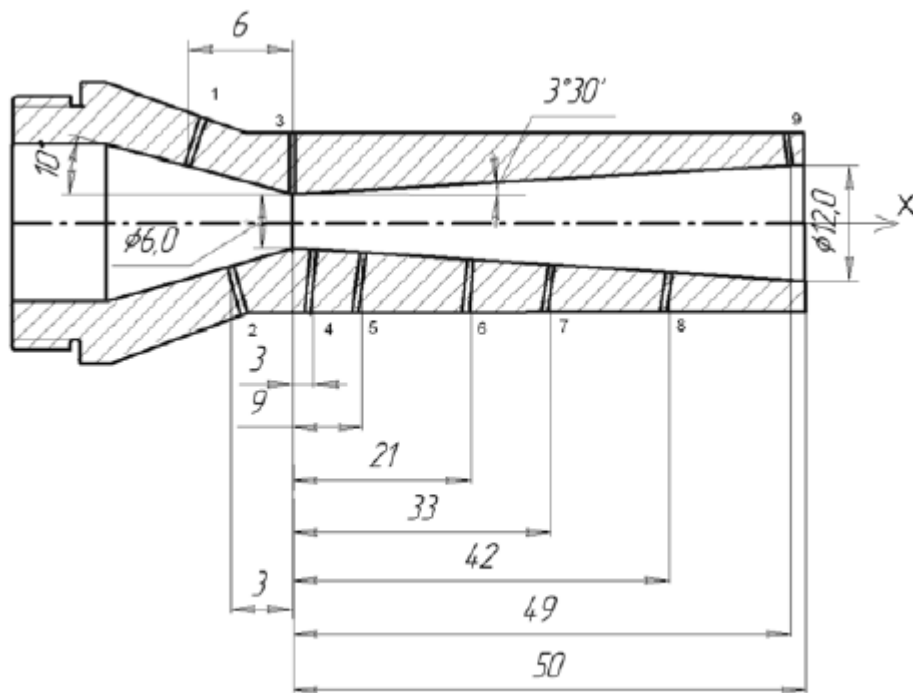


Рисунок 2. Модельное сопло с приемными отверстиями для измерения давления

### Исходные данные:

Таблица 1. Таблица исходных данных

-	P <sub>0</sub> (атм)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	T, К
P(ати)	32	28,5	26	15	12,5	6,0	2,7	0,85	0,3	0	288
P(ата)	33	29,5	27	16	13,5	7,0	3,7	1,85	1,3	1	288

### Обработка результатов измерений:

Шаг 1. Нахождение распределения чисел М вдоль сопла

clc

clear all

%нахождение критического сечения сопла

R=3

Fkr=pi\*R^2 = 28.27 мм^2. , q(M)=1

$$q(M) = \frac{F_*}{F}$$

$$q(M) = M \frac{\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}$$

Докритическая часть сопла:

— Точка 1.

$$x1 = 6 \cdot \tan(10) = 1.058 \text{ mm}$$

$$F1 = \pi \cdot (R + x1)^2 = 51.73 \text{ mm}^2$$

$$q1 = F_{kr} / F1 = 0.5465$$

$$eq1 := 0.5465 = \frac{M \cdot \left(\frac{1.4+1}{2}\right)^{\frac{(1.4+1)}{2(1.4-1)}}}{\left(1 + \frac{(1.4-1)}{2} \cdot M^2\right)^{\frac{(1.4+1)}{2(1.4-1)}}}$$

$$0.5465 = \frac{1.728000000M}{(1 + 0.200000000M^2)^{3.000000000}}$$

$$M1 := \text{solve}(eq1, M)$$

$$0.33850742302.0954974490.8314827893+ 3.918497607I, \\ -2.048485225+ 2.604972220I, -2.048485225- 2.604972220I, \\ 0.8314827893- 3.918497607I$$

С помощью Maple 13 находим значение М. Для докритической части берём М<1, для закритической М>1. Для остальных точек расчёт будет проводиться таким же образом. М1=0.339

— Точка 2.

$$x2 = 3 \cdot \tan(10) = 0.5290 \text{ mm}$$

$$F2 = \pi \cdot (R + x2)^2 = 39.125 \text{ mm}^2$$

$$q2 = F_{kr} / F2 = 0.7227$$

$$M2 = 0.478$$

Закритическая часть сопла:

— Точка 4.

$$x4 = 3 \cdot 0.0611 = 0.1833 \text{ mm}$$

$$F4 = \pi \cdot (R + x4)^2 = 31.835 \text{ mm}^2$$

$$q4 = F_{kr} / F4 = 0.8882$$

$$M_4=1.42$$

— Точка 5.

$$x_5=9*0.0611=0.5499 \text{ mm}$$

$$F_5=\pi*(R+x_5)^2=39.590 \text{ mm}^2$$

$$q_5=F_{kr}/F_5=0.7142$$

$$M_5=1.76$$

— Точка 6.

$$x_6=21*0.0611 = 1.2831 \text{ mm}$$

$$F_6=\pi*(R+x_6)^2=57.6323 \text{ mm}^2$$

$$q_6=F_{kr}/F_6=0.4906$$

$$M_6=2,22$$

— Точка 7.

$$x_7=33*0.0611=2.0163 \text{ mm}$$

$$F_7=\pi*(R+x_7)^2=79.0527 \text{ mm}^2$$

$$q_7=F_{kr}/F_7=0.3577$$

$$M_7=2,56$$

— Точка 8.

$$x_8=42*0.0611=2.5662 \text{ mm}$$

$$F_8=\pi*(R+x_8)^2=97.3347 \text{ mm}^2$$

$$q_8=F_{kr}/F_8=0.2905$$

$$M_8=2.78$$

— Точка 9.

$$x_9=49*0.0611=2.9939 \text{ mm}$$

$$F_9=\pi*(R+x_9)^2=112.86 \text{ mm}^2$$

$$q_9=F_{kr}/F_9=0.2505$$

$$M_9=2.94$$

На выходе:

$$F_{exit}=\pi*6^2=113.0973 \text{ mm}^2$$

$$q_{exit}=F_{kr}/F_{exit}=0.2500$$

$$M_{max}=2.94$$

Таблица 2. Значения числа Маха при отношении площадей

номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Выход
$F^*/F$	0.5465	0.7227	1	0.8882	0.7142	0.4906	0.3577	0.2905	0.2505	0.2505
M	0.339	0.478	1	1.42	1.76	2.22	2.56	2.78	2.937	2.94

Шаг 2. Поиск отношений с помощью газодинамических функций в выделенных сечениях

```
clc
```

```
clear all
```

```
M=[0.339;0.478;1;1.42;1.76;2.22;2.56;2.78;2.937;2.94];
```

```
y=1.4;
```

```
%определяем отношения в выделенных сечениях
```

```
a=(1+((y-1)/2).*(M.^2)).^(-0.5);
```

```
T=(1+((y-1)/2).*(M.^2)).^(-1);
```

```
po=(1+((y-1)/2).*(M.^2)).^(-1/(y-1));
```

```
p=(1+((y-1)/2).*(M.^2)).^(-y/(y-1));
```

```
v=((y-1)/2).*(M.^2)/(1+((y-1)/2).*(M.^2)).^(0.5);
```

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	выход
$F^*/F$	0.5465	0.7227	1	0.8882	0.7142	0.4906	0.3577	0.2905	0.2505	0.2505
M	0.339	0.478	1	1.42	1.76	2.22	2.56	2.78	2.937	2.94
$a/a_0$	0.9887	0.9779	0.9129	0.8442	0.7858	0.7097	0.6578	0.6268	0.6058	0.6054
$T/T_0$	0.9775	0.9563	0.8333	0.7126	0.6175	0.5036	0.4328	0.3928	0.3669	0.366
$p_0/p_0$	0.9448	0.8943	0.6339	0.4287	0.2996	0.1800	0.1232	0.0967	0.0816	0.0813
$p/p_0$	0.9235	0.8552	0.5283	0.3055	0.1850	0.0906	0.0533	0.0380	0.0299	0.0298
$V/V_{max}$	0.1503	0.2089	0.4083	0.5361	0.6125	0.7046	0.7532	0.7803	0.7950	0.7959

Шаг 3. Построение графиков изменения чисел, полученных выше, вдоль сопла.

```
clc
```

```
clear all
```

```

x=[-6;-3;0;3;9;21;33;42;49;50];
M=[0.339;0.478;1;1.42;1.76;2.22;2.56;2.78;2.937;2.94];
a=[0.9888;0.9779;0.9129;0.8442;0.7858;0.7097;0.6578;0.6268;0.6058;0.6054];
T=[0.9775;0.9563;0.8333;0.7126;0.6175;0.5036;0.4328;0.3928;0.3669;0.366];
ro=[0.9448;0.8943;0.6339;0.4287;0.2996;0.1800;0.1232;0.0967;0.0816;0.0813];
p=[0.9235;0.8552;0.5283;0.3055;0.1850;0.0906;0.0533;0.0380;0.0299;0.0298];
v=[0.1503;0.2089;0.4083;0.5361;0.6125;0.7046;0.7532;0.7803;0.7950;0.7959];
h=-6:0.001:51;
gra=pchip(x,a,h);
figure(1)
plot(x,a,'x',h,gra);
axis([-6,51,0,1]);
hold on
grid on
grt=pchip(x,T,h);
plot(x,T,'x',h,grt);
grro=pchip(x,ro,h);
plot(x,ro,'x',h,grro,'-.');
grp=pchip(x,p,h);
plot(x,p,'x',h,grp);
grv=pchip(x,v,h);
plot(x,v,'x',h,grv,'--');
xlabel('Сечение,мм');
ylabel('Изменение параметра');
legend('','a/a0','','T/T0','','ro/ro0','','p/p0','','v/vmax')
hold off
figure(2)
grM=pchip(x,M,h)
plot(x,M,'x',h,grM)
grid on

```

```
axis([-8,51,0.3,3])
```

```
xlabel('Сечение,мм');
```

```
ylabel('Число М');
```

График основных зависимостей приведён ниже (за точку 0 по длине сопла взято критическое сечение сопла).

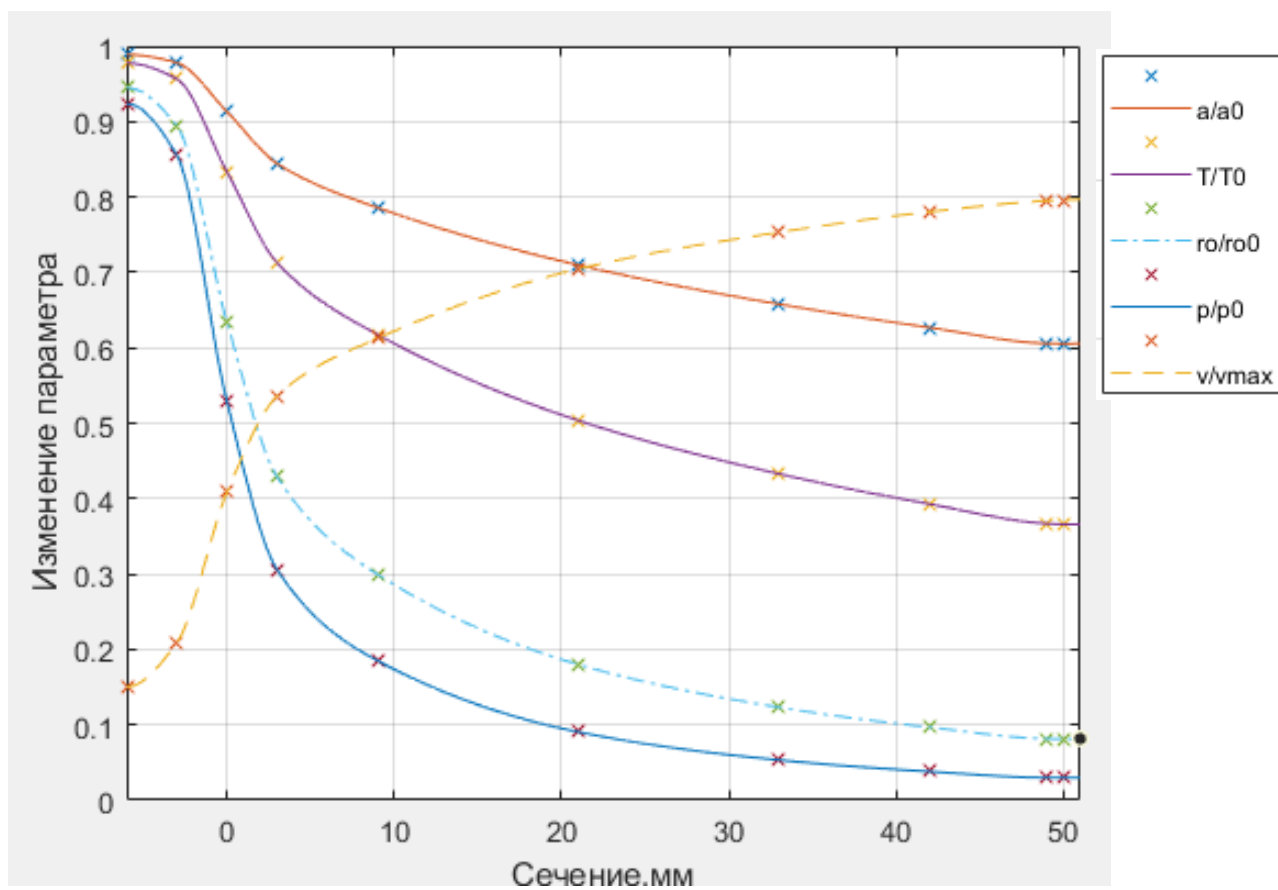


Рисунок 3. Изменение газодинамических параметров вдоль сопла



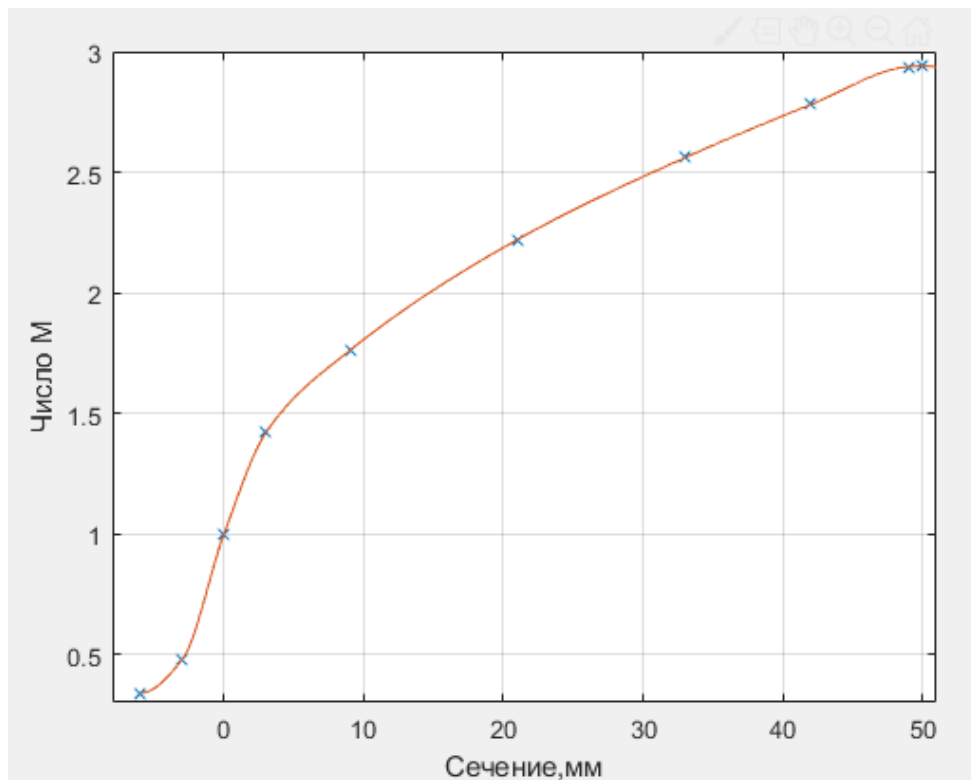


Рисунок 4. Изменение числа Маха вдоль сопла

Шаг 4. На основе замеренных данных построить графики распределения давления вдоль сопла. Провести сравнение экспериментальных данных с результатами расчета.

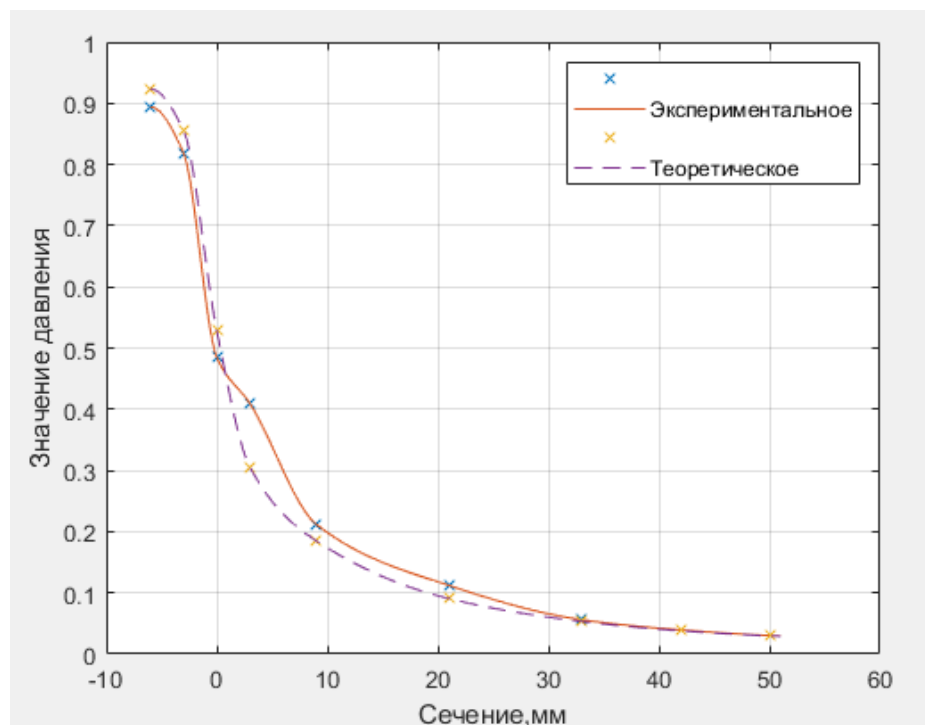


Рисунок 5. Экспериментальное и теоретическое распределение давления вдоль сопла

```

clc
clear all
p=[29.5;27;16;13.5;7.0;3.7;1.85;1.3;1];
p0=33
P=p/p0
x=[-6;-3;0;3;9;21;33;42;50];
pteor=[0.9235;0.8552;0.5283;0.3055;0.1850;0.0906;0.0533;0.0380;0.0298];
h=-6:0.001:51;
grP=pchip(x,P,h);
grpteor=pchip(x,pteor,h)
figure(3)
plot(x,P,'x',h,grP)
grid on
hold on
plot(x,pteor,'x',h,grpteor,'--');
xlabel('Сечение,мм');
ylabel('Значение давления');
legend('','Экспериментальное','Теоретическое')

```

Шаг 5. Определить величину расхода газа через сопло

$$Q = \frac{f * p_0 * F^*}{\sqrt{T_0}}$$

```

clc
clear all
y=1.4;
R=287.1;
T0=288;
f=0.0404;
p0=33*101325;
Rad=3;
Fkr=pi*Rad^2/10^6;

```

### %расчёт расхода газа

$$Q=(f \cdot p_0 \cdot F_{kr})/\sqrt{T_0}=0.2251 \text{ кг/с}$$

Шаг 6. Определить величину реактивной силы

$$P = Q \cdot V_a + (p_a - p_H) \cdot F_a$$

### %расчёт величины реактивной силы

$$V_{otn}=0.7959;$$

$$V_{max}=\sqrt{(2 \cdot \gamma \cdot R \cdot T_0)/(\gamma-1)}$$

$$V_a=V_{otn} \cdot V_{max}$$

$$p_H=101325;$$

$$p_a=(1/33) \cdot p_0$$

$$F_a=113.0973 \cdot 10^{-6}$$

$$P=Q \cdot V_a + (p_a - p_H) \cdot F_a$$

Шаг 7. Определить величину удельной тяги

$$P_{уд} = V_a + \frac{(p_a - p_H) \cdot F_a}{Q}$$

$$P_{уд}=V_a+((p_a-p_H) \cdot F_a)/Q$$

Таблица 3. Результаты расчётов

Q, кг/с	P, Н	P <sub>уд</sub> , м/с
0.2251	136.28	605.5

**Вывод:** в ходе лабораторной работы были изучены изменения параметров и рассчитаны параметры газового потока в сопле Лавалья, а также определены следующие величины – расход газа через сопло – 0.2251 кг/с, реактивная сила – 136,28 Н, удельная тяга – 605,5. Также теоретический и экспериментальный график распределения давления вдоль сопла практически совпали.