

Отчёт по работе № 12

«Изучение режимов истечения газа из сопла Лавалья»

Работу выполнили
студенты группы Б03-906:
Кузьмичёва Евдокия
Орифов Далер
Петров Дмитрий
Пыряев Евгений

Цель работы:

- ознакомиться с работой сопла Лаваля и различными режимами истечения воздуха из него;
- определить параметры потока на выходе из сопла и сравнить с рассчитанными по одномерной теории.

В работе используются:

- оптическая система визуализации
- пружинный манометр
- сменные сопла
- ресивер, редуктор, баллон с воздухом

Теоретические сведения

Одномерная теория сверхзвукового сопла

Сопло — закрытый канал переменного сечения, предназначенный для разгона газа или жидкости. Будем считать течение в канале стационарным, одномерным, адиабатическим, а газ идеальным и калорически совершенным. Обозначим через ρ плотность газа, через u скорость вдоль оси x и через A местное сечение канала. Из уравнения неразрывности (1) и уравнения Эйлера (2) можно получить соотношение между изменениями скорости и площади сечения трубы.

$$\rho u A = \text{const} \quad (1)$$

$$u \frac{du}{dx} = - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} \quad (2)$$

Перепишем уравнение Эйлера в виде:

$$u du = - \frac{1}{\rho} dp = \frac{dp}{d\rho} \frac{d\rho}{\rho} = - a^2 \frac{d\rho}{\rho} \quad (3)$$

Проведём логарифмическое дифференцирование уравнения непрерывности:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{du}{u} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (4)$$

Подставив выражение для $\frac{d\rho}{\rho}$ из (4) в (3), получаем:

$$u du = a^2 \left(\frac{du}{u} + \frac{dA}{A} \right),$$

откуда, используя $M = \frac{u}{a}$:

$$(M^2 - 1) \frac{du}{u} = \frac{dA}{A} \quad (5)$$

Соотношение (5) называется соотношением Гюгоню. Из анализа (5):

- если $M < 1$ (дозвуковое течение), знаки изменения u и A противоположны; с увеличением u ρ уменьшается, и при малых u , когда сжимаемость мала, для увеличения u необходимо уменьшение A .
- если $M > 1$ (сверхзвуковое течение), знаки изменения u и A одинаковы; уменьшение ρ не компенсируется ростом u , и для ускорения газа A должно увеличиваться.

- если $M = 1$, то $dA = 0$, соответствующее минимальное сечение A^* называется критическим.

Из уравнения неразрывности и изоэнтропических соотношений для параметров газа в потоке можно получить связь между параметрами одномерного газового потока и площадью сечения канала:

$$q^{-1} = \frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (6)$$

$$\pi = \frac{p}{p^*} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{\rho}{\rho^*} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{1}{\gamma-1}} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{T}{T^*} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-1} \quad (9)$$

Здесь A^* , p^* , ρ^* , T^* — параметры в критическом сечении.

Геометрическое определение числа Маха:

$$M^2 = \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \left(\frac{A}{A^*} M \right)^{\frac{2\gamma-1}{\gamma+1}} - \frac{2}{\gamma-1} \quad (10)$$

Физическое определение числа Маха:

$$M^2 = \frac{\gamma-1}{2\gamma} + \frac{\gamma+1}{2\gamma} \left(\frac{p'_0}{p_0} \right)^{-(\gamma-1)} \left(\frac{2}{\gamma+1} \left(\frac{1}{M^2} + \frac{\gamma-1}{2} \right) \right)^{-\gamma} \quad (11)$$

Если предположить, что течение в сопле изоэнтропично, то определить число Маха из соотношения:

$$\frac{p'_0}{p_0} = \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} M^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right)^{-\frac{1}{\gamma-1}} \left(\frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2}{\frac{\gamma+1}{2} M^2} \right)^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad (12)$$

где p_0 — давление торможения, измеренное в форкамере, p'_0 — давление торможения за прямым скачком уплотнения.

Для получения сверхзвукового потока газа необходимо пропустить его сначала через сужающийся канал, затем через расширяющийся. Такое сопло называется соплом Лаваля. Рассмотрим течение в таком сопле, считая его адиабатическим и изоэнтропическим.

Если величина противодавления окружающей среды (p_a) равна расчётному значению для сверхзвуковой ветви, то реализуется расчётный режим истечения из сопла.

Если p_a больше минимального расчётного значения для дозвукового режима со звуковой скоростью в горле сопла и меньше расчетного значения для сверхзвукового режима истечения, то течение в сопле изоэнтропично. При этом дозвуковых режимов может реализовываться сколько угодно и определяются они величиной p_a . Причём

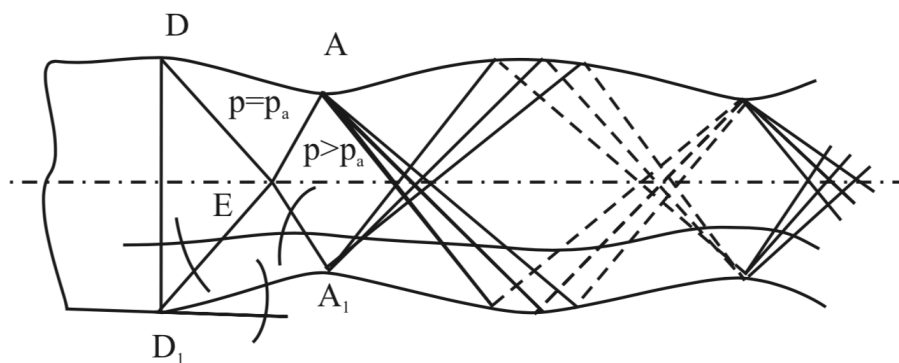
$p_c = p_a$ (p_c — давление в потоке на срезе сопла), а сверхзвуковой только один, т.к. изменение внешних условий не влияет на сверхзвуковой поток.

Если p_a меньше минимального расчётного значения для дозвукового режима и больше некоторого предельного (превышающего расчётное сверхзвуковое значение), при котором ещё реализуется сверхзвуковая скорость на срезе, нарушается изоэнтропичность течения в сопле, и расчёты надо производить с учётом существования скачков уплотнения.

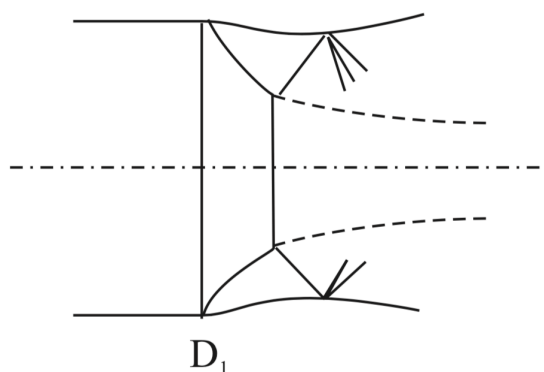
Характер сверхзвукового истечения, т.е. структуры течения вне сопла, определяется соотношением p_a и p_c . За соплом неизобарическая сверхзвуковая струя имеет участок, который характеризуется наличием системы скачков уплотнения и волн разрежения, на которых давление в струе выравнивается с давлением окружающей среды. Струя распространяется в покоящемся газе, то скачки уплотнения и волны разрежения не выходят за пределы струи, отражаясь от границы неподвижного и движущегося газа так, что скачки уплотнения отражаются волнами разрежения, волны разрежения — скачками уплотнения. Это следует из граничных условий на границе струи и окружающей среды.

Истечение газа с перерасширением

При перерасширении $p_c < p_a$ и струя начинает сжиматься. При этом возникают косые скачки уплотнения DE и D_1E , за которыми давление становится равным p_a , а после отражённых от оси потока скачков EA и EA_1 давление возрастает ещё больше. Далее течение происходит так же, как в случае недорасширения.

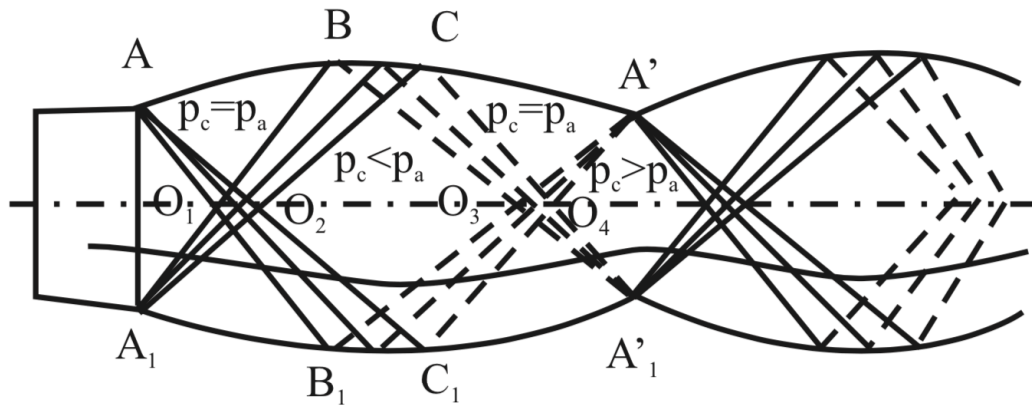


Снижение p_c увеличивает угол наклона скачков DE и D_1E и, соответственно, угол поворота потока в этих скачках и в скачках EA и EA_1 . При некотором p_c ударная волна принимает мостобразную форму из-за невозможности отражения скачков EA и EA_1 от оси течения. При дальнейшем уменьшении p_c скачок перемещается внутрь сопла.

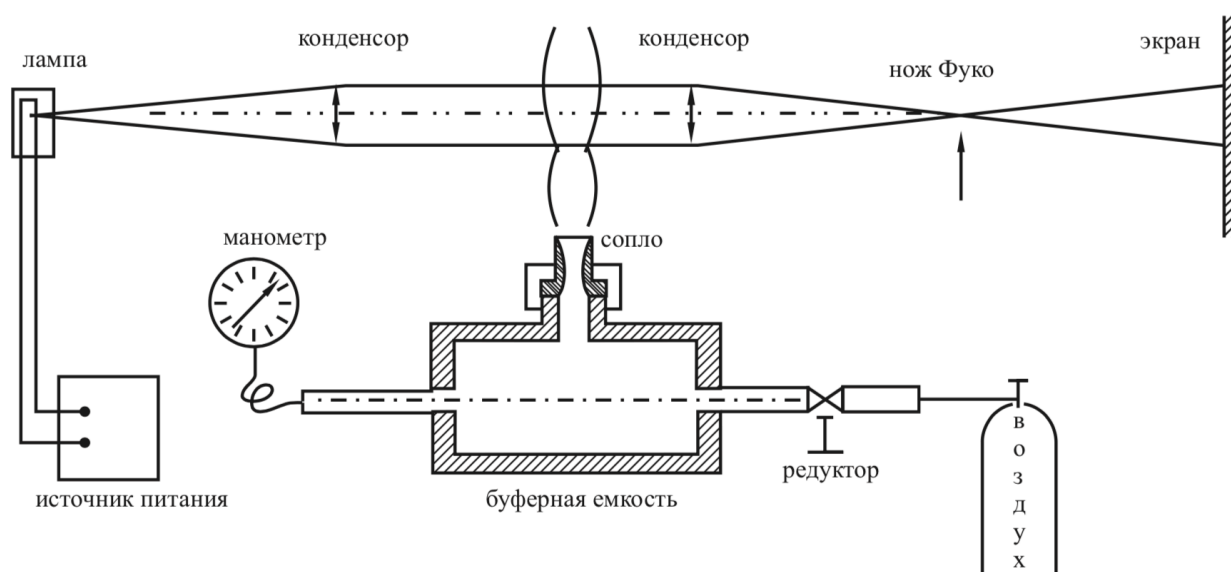


Истечение газа с недорасширением

При перерасширении $p_a < p_c$, течение происходит как бы из укороченного сопла. Сразу за срезом сопла AA_1 начинается расширение струи. Оно происходит в веере волн разрежения AB_1C_1 и A_1BC . После расширения в веере AO_1O_2 давление в струе выравнивается до p_a , в веере O_1BO_2C падает до $p_c < p_a$, т.е. струя перерасширяется. На границе свободной струи волны разрежения отражаются волнами сжатия, поэтому далее струя начинает сжиматься и за волнами BO_3CO_4 давление в струе снова выравнивается с p_a , а за волнами $O_3A_1O_4$ возрастает до $p_c > p_a$. Далее процесс повторяется.



Экспериментальная установка



Воздух из баллона высокого давления поступает в ресивер через редуктор. Ресивер служит для выравнивания параметров газа в предсопловом объёме. Давление в нём устанавливается и регулируется редуктором. К ресиверу подсоединяются сменные сопла, позволяющие получить потоки газа с различными числами Маха.

Установка оснащена оптической системой визуализации. Она состоит из точечного источника света, набора линз, ножа Фуко и экрана.

Давление в ресивере измеряется пружинным манометром. Для распределения полного давления вдоль струи используется насадок полного давления, соединённый с пружинным манометром.

Экспериментальные данные

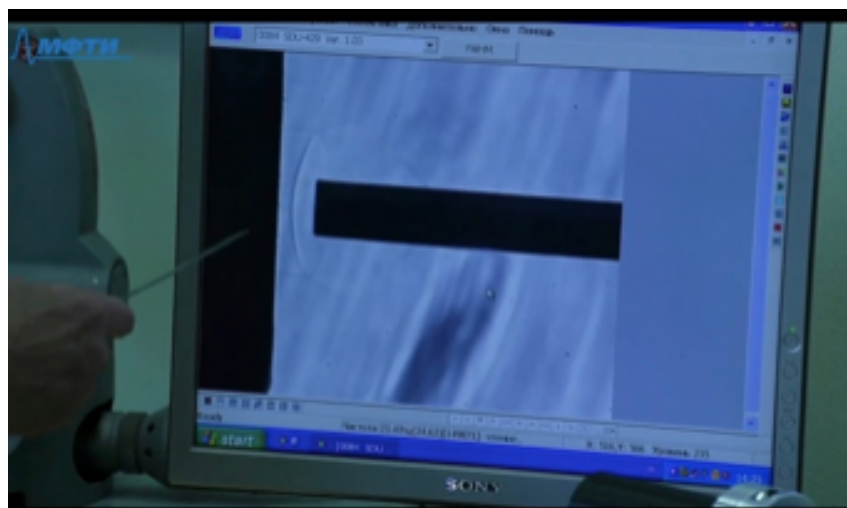
Измеряем геометрические характеристики сопел; для каждого сопла снимаем значения p_0 (давление торможения, измеренное в форкамере) и p'_0 (давление торможения за прямым скачком уплотнения).

	Стекло	Алюминий	Латунь
$d_{\text{вых}}, \text{ мм}$	1.698	2.275	3.678
$d_{\text{кр}}, \text{ мм}$	1.542	1.575	3.329
$p_{01}, \text{ атм}$	3.92	11.2	
$p_{01}', \text{ атм}$	3.625	6.895	
$p_{02}, \text{ атм}$	16	6	2.5

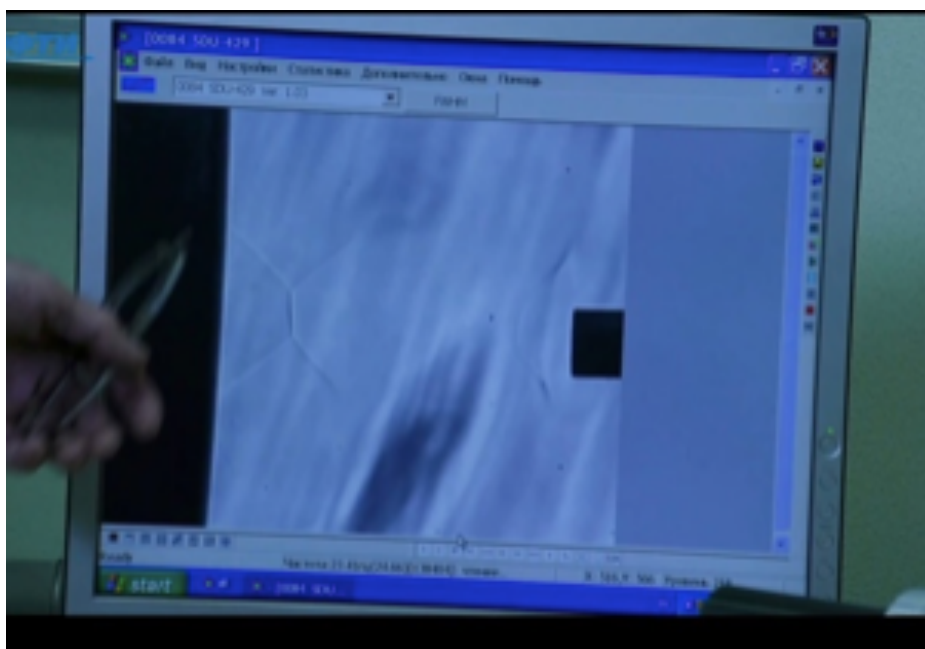
Истечение с большим режимом недорасширения



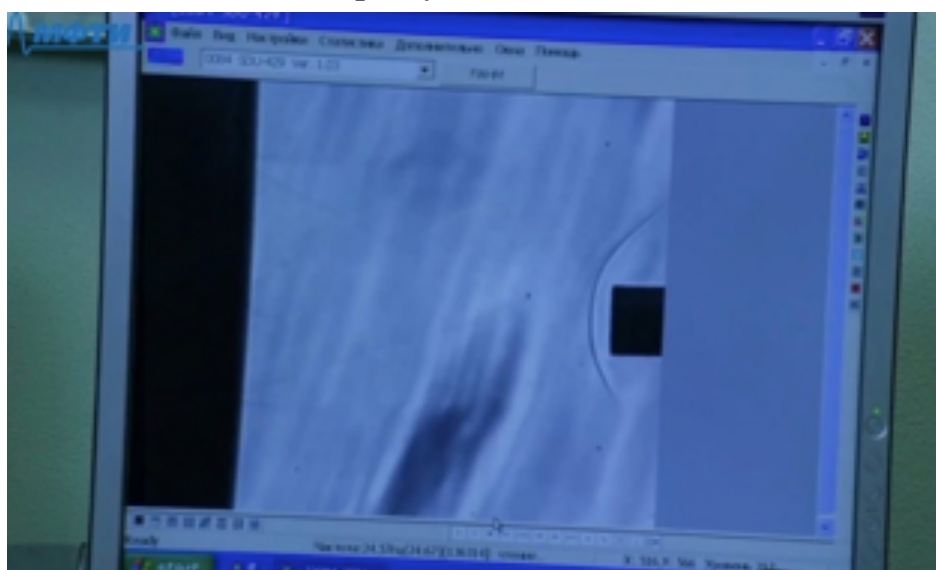
Свободное обтекание носика трубки напоров на режиме истечения, близком к расчётному (скачок уплотнения)



Истечение с перерасширением с характерной мостовой схемой



Сверхзвуковое течение



Обработка результатов

	Стекло	Алюминий	Латунь
M (геометрическое)	1.55134	2.24466	1.56215
M (физическое)	1.50153	2.20861	
q	0.82470	0.47929	0.81922
p_1 , атм (по геометрическому числу Маха)	0.991	0.977	
p_1 , атм (по физическому числу Маха)	1.065	1.016	
p_1 , атм (среднее) (давление истекающей струи)	1.028	0.996	
p_2 , атм (по геометрическому числу Маха)	4.04424	0.52325	0.62196
p_2 , атм (по физическому числу Маха)	4.34880	0.55362	
p_2 , атм (среднее) (давление на выходе)	4.19652	0.53844	0.62196
p_{02}' , атм (по геометрическому числу Маха)	9.31000	3.65756	8.97277
p_{02}' , атм (по физическому числу Маха)	11.07760	3.74532	
p_{02}' , атм (среднее) (давление торможения за прямым скачком уплотнения)	10.1938	3.70144	8.97277

1. По формулам (10) и (11) рассчитываем геометрическое и физическое число Маха, используя метод последовательных приближений.
2. По измеренным p_{01} рассчитываем давление истекающей струи p_1 по формуле (7).
3. По данным p_{02} рассчитываем давление на выходе из струи p_2 по формуле (7).
4. По данным p_{02} рассчитываем давление торможения за прямым скачком уплотнения p_{02}' по формуле (12).

Рассчитаем степень нерасчётности для стеклянного и алюминиевого сопел:

- **стекло**

$$p_{\text{вых}} / p_{\text{вн}} = \frac{1.028 \text{ atm}}{1 \text{ atm}} = 1.028 \quad \Rightarrow \quad \text{недорасширение, режим близкий к}$$

расчётному

- **алюминий**

$$p_{\text{вых}} / p_{\text{вн}} = \frac{0.996 \text{ atm}}{1 \text{ atm}} = 0.996 \quad \Rightarrow \quad \text{перерасширение, режим близкий к}$$

расчётному

Вывод

Была выполнена работа по изучению принципа работы сопла Лаваля. Мы рассмотрели одномерную теорию сопла в режиме непрерывного ускорения потока, а также продемонстрировали и получили сверхзвуковое течение в различных режимах а также измерили его параметры. Полученные значения отличаются от посчитанных теоретически незначительно.