

Министерство образования российской федерации

Московский физико-технический институт

кафедра физической механики

Изучение режимов истечения газа из сопла Лавалья

лабораторная работа № 15

Автор:
доцент, к.ф.-м.н. В.А. Волков

Рецензент:
доцент, к.ф.-м.н. В.П.Вакатов

Заведующий кафедрой:
профессор, д.ф.-м.н. Э.Е.Сон

1 Введение

В настоящей работе предлагается ознакомиться с работой сопла Лавалья и различными режимами истечения воздуха из него. Для визуализации потока используется теневой и шпирен-методы. Измеряются давление газа в ресивере и давление в струе насадком полного напора. По измеренным данным определяются параметры потока на выходе из сопла и сравниваются с рассчитанными по одномерной теории. Предусмотрена возможность изменения давления торможения и реализация случаев расчетного и нерасчетных режимов истечения.

2 Изучение работы сверхзвукового сопла

Издавна в технике широко используются устройства для получения потоков жидкости и газа с регулируемыми параметрами. Для исследовательских целей это аэродинамические трубы, в технике это реактивные двигатели, инжекторы, турбины, дроссельные устройства, регуляторы различного рода и т.п. Во всех этих устройствах основным элементом является сопло.

Соплом обычно называют закрытый канал переменного сечения, предназначенный для разгона газа или жидкости. Рассмотрим основные требования к профилю канала, которым он должен удовлетворять, чтобы получить желаемое изменение скорости потока. Будем считать, что течение в канале стационарное, одномерное (т.е. параметры потока зависят только от координаты x (вдоль оси трубы)), адиабатическое, а газ идеальный и калорически совершенный (т.е. его теплоемкость C_p и C_v постоянны). Тогда обозначив через ρ - плотность газа, через u - скорость вдоль оси x и через A - местное сечение канала, и воспользовавшись уравнением неразрывности

$$\rho u A = const \quad (1)$$

и уравнением Эйлера:

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

можно получить соотношение между изменениями скорости и площади сечения трубы (см., например, [1]). Уравнение Эйлера удобно представить в виде:

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

Произведя логарифмическое дифференцирование (1), можно записать

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

Подставляя значение $d\rho/\rho$ из (4) в (3), получим:

$$u du = a^2 \left(\frac{du}{u} + \frac{dA}{A} \right) \quad (5)$$

или

$$(u^2 - a^2) \frac{du}{u} = a^2 \frac{dA}{A} \quad (6)$$

или через число $M = u/a$:

$$(M^2 - 1) \frac{du}{u} = \frac{dA}{A} \quad (7)$$

Это соотношение носит имя Гюгонио.

Анализируя его, видим, что если $M < 1$, т.е. течение дозвуковое, знаки изменения скорости потока и площади сечения канала противоположны. При возрастании площади сечения скорость уменьшается, и наоборот. Если $M > 1$, т.е. течение газа сверхзвуковое, с увеличением площади сечения канала скорость растет, и наоборот. Это происходит потому, что с увеличением скорости газа плотность его уменьшается, и, при малых скоростях, когда сжимаемость незначительна, для увеличения скорости необходимо уменьшать сечение канала, а при $M > 1$ уменьшение плотности не компенсируется ростом скорости, и для ускорения газа сечение канала должно увеличиваться. Если $M = 1$, то $dA = 0$, соответствующее минимальное сечение называется критическим.

Используя уравнение неразрывности (1) и изоэнтروпические соотношения для параметров газа в потоке, можно получить связь между параметрами одномерного газового потока и площадью сечения канала:

$$q = \frac{A}{A^*} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \frac{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}{M} \quad (8)$$

$$\pi = \frac{p}{p^*} = \left[\frac{2}{k+1} \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \right]^{-\frac{k}{k-1}} \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{\rho}{\rho^*} = \left[\frac{2}{k+1} \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \right]^{-\frac{1}{k-1}} \quad (10)$$

$$\tau = \frac{T}{T^*} = \left[\frac{2}{k+1} \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \right]^{-1} \quad (11)$$

Здесь звездочкой обозначены параметры в критическом сечении. На рис. 1 приведен график зависимости для воздуха ($k = C_p/C_v = 1,4$) числа M от отношения сечений.

Таким образом, как следует из вышесказанного, для получения сверхзвукового потока газа необходимо сначала пропустить его через сужающийся канал, а затем через расширяющийся. Такие сопла носят имя Лавалля, шведского инженера, впервые использовавшего их в газовых турбинах. Рассмотрим течение в таком сопле, считая его адиабатическим и изоэнтропическим. Пользуясь изоэнтропическими формулами, можно построить для заданной конфигурации сопла значения чисел M потока и p/p^* в зависимости от координаты вдоль сопла. Соответствующие зависимости приведены на рис.2 [1].

Зависимости рис. 2 (б и в) можно получить из (8) и (9), пользуясь соответственно правой (сверхзвуковой) и левой (дозвуковой) ветвью зависимости рис. 1) $A/A^* = f(M)$ и затем используя изоэнтропическую формулу (9) для расчета давления.

Если величина противодавления окружающей среды равна расчетному значению для сверхзвуковой ветви, то реализуется расчетный режим истечения из сопла.

Если величина p_a больше минимального расчетного значения для дозвукового режима истечения 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 , причем $p_c = p_a$,

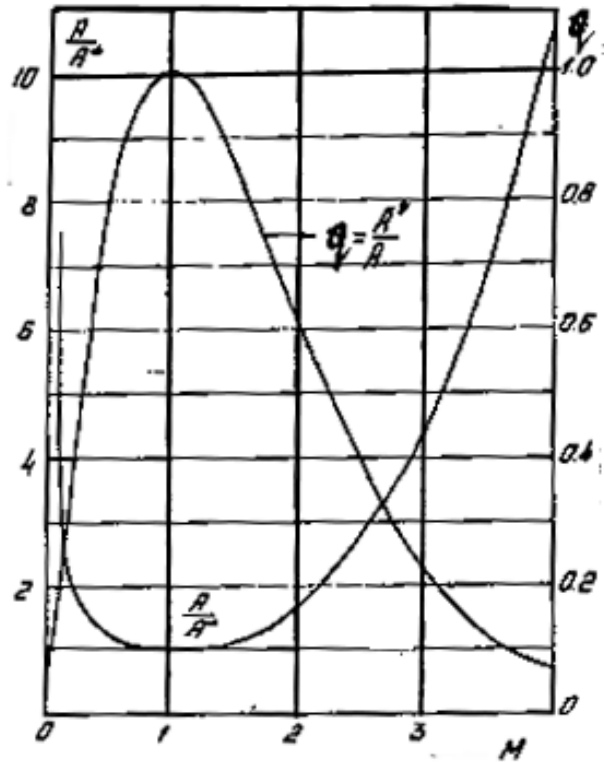


Рис. 1: Зависимость числа M потока в сопле от отношения сечений

а сверхзвуковой только один, т.к. изменение внешних условий не влияет на сверхзвуковой поток.

В случае, когда величина противодавления p_a меньше минимального расчетного дозвукового значения и больше некоторого предельного (превышающего расчетное сверхзвуковое значение), при котором еще реализуется сверхзвуковая скорость на срезе, нарушается изоэнтропичность течения в сопле, и расчеты надо производить с учетом существования скачков уплотнения.

При реализации изоэнтропического течения внутри сопла значение числа M потока плавно изменяется вдоль сопла и зависит только от отношения A/A^* . Единственность сверхзвукового режима истечения для данного сопла объясняется тем, что при достижении звуковой скорости в критическом течении возмущения из сверхзвуковой части сносятся сверхзвуковым потоком и не достигают ресивера.

Режим сверхзвукового истечения, т.е. структуры течения вне сопла, как уже указывалось, определяется соотношением противодавления (т.е. давления окружающей среды) и давлением на срезе сопла. За соплом неизобарическая сверхзвуковая струя имеет некоторый участок, который характеризуется наличием системы скачков и волн разрежения, на котором происходит выравнивание давления в струе с давлением окружающей среды. При этом, так как струя распространяется в покоящейся газе, то скачки уплотнения и волны разрежения не выходят за пределы струи, отражаясь от границы неподвижного и движущегося газа таким образом, что скачки уплотнения отражаются волнами разрежения, а волны разрежения отражаются скачками уплотнения. Это следует из условия равенства давления на границе струи и в окружающей среде. Рассмотрим два возможных режима истечения. В случае, если противодавление меньше, чем давление на срезе, реализуется режим истечения с недорасширением, т.е. как бы из укороченного сопла (рис. 3).

В этом режиме сразу за срезом сопла AA_1 начинается расширение струи, так как давление в ней больше, чем в окружающей среде. Оно происходит в виде волн разрежения AB_1C_1 и

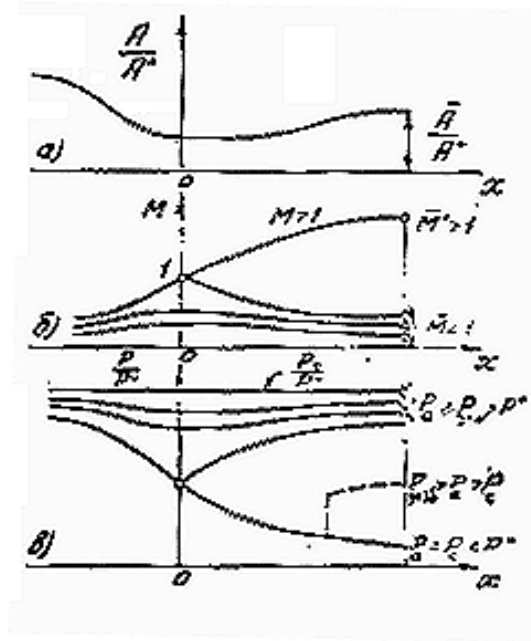


Рис. 2: Распределение числа M потока и отношения давлений в сопле по его длине. p_a - давление в окружающей среде; p_c - давление в потоке на срезе сопла; v^* - давление в критическом сечении.

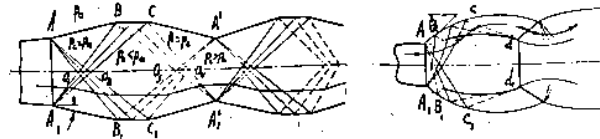


Рис. 3: а) Схема сверхзвуковой плоской недорасширенной струи идеального газа, б) То же для осесимметричной струи идеального газа

A_1BC . Далее в силу симметричности картины будем говорить о верхней половине струи. После расширения в веере AO_1O_2 давление в струе выравнивается до p_a , в веере O_1BO_2C давление падает до $p_c < p_a$, т.е. струя перерасширяется. Так как на границе свободной струи волны разрежения отражаются в виде волн сжатия, то 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 значения $p_c > p_a$. Далее весь процесс повторяется с постепенным ослаблением волн обоих типов и выравниванием поля скоростей в струе.

3 Истечение с перерасширением

В случае перерасширения давление в выходном сечении p_c меньше, чем противодавление 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 отраженных от оси потока скачков EA и EA_1 давление возрастает еще больше $p > p_a$. Далее течение происходит так же, как и в случае с недорасширением. (рис. 4).

Снижение давления на срезе сопла увеличивает угол наклона скачков DE и D_1E , и, соответственно, угол поворота потока в этих скачках и равный ему угол поворота в скачках EA и EA_1 . При некотором значении p_c ударная волна принимает мостообразную форму, как на рис. 5. Из-за невозможности отражения скачков EA и EA_1 от оси течения и при дальнейшем

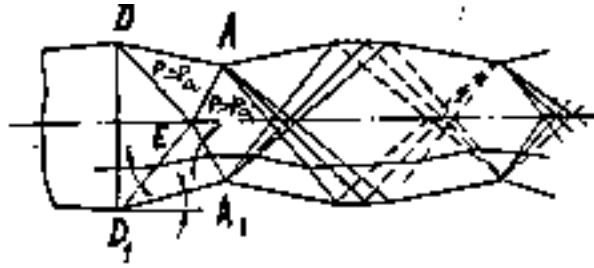


Рис. 4: Сверхзвуковая струя идеального газа при перерасширении

уменьшении давления скачок перемещается внутрь сопла. В этом случае для определения параметров на срезе сопла уже нельзя пользоваться изэнтропическими соотношениями.

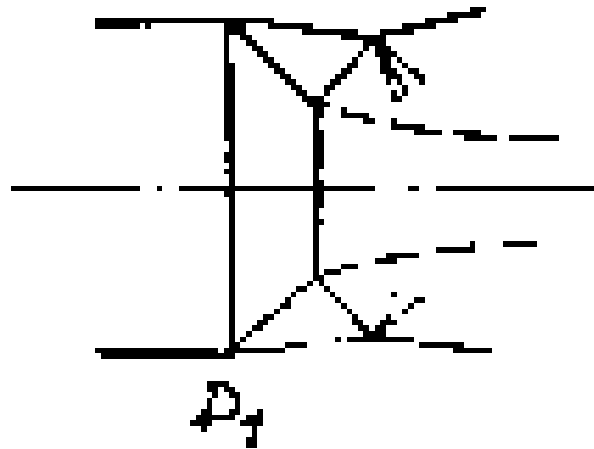


Рис. 5: Струя идеального газа при перерасширении

4 Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рис. ??.

Воздух из баллона высокого давления через редуктор поступает в ресивер. Ресивер представляет собой толстостенный цилиндр объемом 200см^3 , служащий для выравнивания параметров газа в предсопловом объеме. Давление в нем устанавливается и регулируется редуктором. К ресиверу подсоединяются сменные сопла. В работе используется набор осесимметричных конических сопел, позволяющих получать потоки газа с различными числами M . Установка оснащена визуализирующей оптической схемой, которая может быть построена в полутеневом или в шпирном варианте. Она состоит из точечного источника света, набора линз, ножа Фуко и экрана. Физические основы полутеневого и шпирного метода изложены в [3]. Давление в ресивере измеряется пружинным манометром. Для измерения распределения полного давления вдоль струи используется насадок полного давления, соединенный с пружинным манометром.

5 Порядок проведения работы

Перед проведением работы, на инструментальном микроскопе произвести измерения геометрических размеров используемых сопел. Провести оценки числа M сопла и вычислить

величины давлений, которые должны быть в ресивере, необходимых для запуска сопла и реализации различных режимов истечения. Измерить для нескольких значений p_0 число M и сравнить с вычисленным. Настроить оптическую схему установки. Получить на экране четкие картины истечения струи из сопла в расчетном и нерасчетном режимах, зарисовать их и объяснить. Провести на режимах, указанных преподавателем, измерения распределения полного давления по длине струи насадком полного напора, сравнить с рассчитанными значениями и сопоставить с полученными картинами течения. По окончании работы необходимо представить полный отчет о проделанной работе.

Список литературы

- [1] Лойцянский Л.Г., *Механика жидкости и газа*, Москва, Наука, 1973.
- [2] Абрамович Г.Н., *Прикладная газовая динамика*, Москва, Наука, 1969.
- [3] Волков В.А., Ткаченко Б.К., *Методы исследования в физической газовой динамике*, Москва, Изд-во МФТИ, 1986.
- [4] Сергель О.С., *Прикладная гидрогазодинамика*, Москва, Машиностроение, 1981.
- [5] *Начала газовой динамики. Методические указания*, Москва, Изд-во МФТИ, 1994.