

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра летательных аппаратов

Б.А. ИЗOTOV

РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ СОПЛА ЛАВАЛЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ ПО КУРСУ
«ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА»

Выпуск 1

Серия научно-методических документов,
содействующих профессиональному
самоопределению студентов в учебном процессе
«Я – СПЕЦИАЛИСТ»

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом
государственного образовательного учреждения высшего профессионального
образования «Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2009

УДК 536:62-225(07)

ББК 22.317я7

И 38

Рецензент

кандидат технических наук, доцент А.Д.Припадчев.

Изотов Б.А.

И 38

Расчет и построение профиля сопла Лавалья: методические указания к лабораторной работе по курсу «Термодинамика и теплопередача». / Б.А. Изотов. - Выпуск 1. Серия научно-методических документов, содействующих профессиональному самоопределению студентов в учебном процессе «Я–специалист»; – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. - 20 с.

Серия изданий «Я – специалист» предназначена для содействия профессиональному самоопределению и повышению профессионального интереса студентов в ходе образовательного процесса. Авторская серия содержит рекомендации, указания и пособия, которые не только традиционно используются в учебном процессе при изучении специальных дисциплин, но и помогают осознать роль инженерной деятельности в изменении окружающего мира, задуматься о месте профессии в структуре жизненного пути, соотнести свои ресурсы с требованиями к профессионалу в конкретной сфере производства.

Лабораторная работа включает теоретическое изложение материала, описание методики расчета и построение профиля сопла Лавалья, даны рекомендации по оформлению лабораторной работы, а так же приведен перечень вопросов, которые необходимо проработать студенту при подготовке к защите лабораторной работы.

Методические указания к лабораторной работе по курсу «Термодинамика и теплопередача» предназначены для студентов всех форм обучения по специальности 160201 – Самолето- и вертолетостроение.

ББК 22.317я7

© Изотов Б.А., 2009

© ГОУ ОГУ, 2009

Содержание

Введение	4
1 Общие указания по выполнению лабораторной работы	5
1.1 Особенности работы сопла Лавалья	5
1.2 Указания по построению профиля сопла Лавалья	10
1.3 Указания по оформлению пояснительной записки и графических материалов	12
1.4 Подготовка к защите лабораторной работы	13
2 Методика расчета сопла Лавалья	15
2.1 Исходные данные	15
2.2 Расчетная схема и обозначение сечений	15
2.3 Расчет основных сечений сопла	16
2.4 Построение профиля сопла Лавалья	17
2.5 Определение параметров потока газа в канале сопла Лавалья	17
Список использованных источников	19
Приложение А Таблица А.1 - Данные для построения графиков изменения параметров потока газа по длине сопла Лавалья	20

Введение

Анализ течения газа по каналам переменного сечения показывает, что скорость газа больше скорости звука может быть получена в комбинированном сопле, состоящем из суживающейся и расширяющейся частей. Такое сопло называется соплом Лавали. Схема сопла Лавали изображена на рисунке 1.

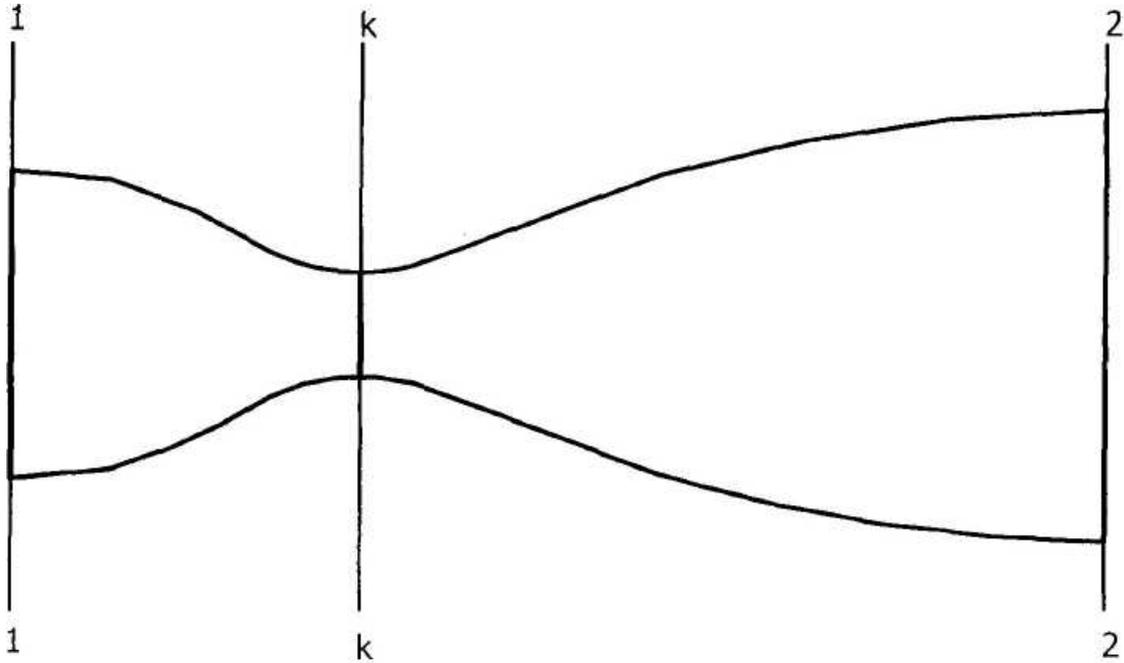


Рисунок 1 - Схема сверхзвукового сопла Лавали

Суживающаяся часть сопла Лавали (между сечениями 1-1 и k-k) работает в области дозвуковых скоростей ($W < \alpha$), а расширяющаяся - в области сверхзвуковых скоростей ($W > \alpha$). Переход потока из области дозвуковых скоростей в сверхзвуковой поток происходит в наименьшем (критическом) сечении сопла, в котором скорость потока равна местной скорости звука.

Расчет и построение профиля комбинированного сопла сводится к определению проходных сечений сопла - F_1 , $F_{кр}$, F_2 (при заданных исходных данных), построению профиля сопла и определению скорости, давления, температуры, плотности, чисел M и λ по длине сопла.

1 Общие указания по выполнению лабораторной работы

1.1 Особенности работы сопла Лавалья

Приступая к расчету сопла Лавалья, необходимо, прежде всего, хорошо разобраться в принципе его работы и уяснить главную особенность любого вида воздействия на газовый поток, в том числе и геометрического воздействия.

Сверхзвуковое сопло представляет собой канал, в котором происходит увеличение скорости потока газа до скорости истечения, превышающей местную скорость звука ($M > 1$) в выходном сечении канала. Обеспечивается это за счет геометрического воздействия. Закон изменения площади (F) канала с геометрическим воздействием на поток газа и связь его с законом изменения скорости потока (W) можно получить, анализируя уравнение профиля энергo-изолированной струи газа (при отсутствии трения). В этом случае уравнение имеет вид

$$\frac{dF}{F} = \frac{dW}{W} * (M^2 - 1), \quad (1)$$

где F - площадь поперечного канала, m^2 ;

W - скорость потока газа, m/c ;

M - число Маха (безразмерная скорость потока газа).

Очевидно, что при увеличении скорости потока, то есть при $dW > 0$, должны выполняться следующие условия:

- а) $dF < 0$, при $M < 1$ (дозвуковой поток);
- б) $dF = 0$, при $M = 1$ (критическое сечение);
- с) $dF > 0$, при $M > 1$ (сверхзвуковой поток).

Другими словами для разгона дозвукового потока необходимо сужение канала, а сверхзвукового - расширение. В этом и заключается сущность геометрического воздействия. В тоже время надо четко представлять себе, что одного лишь геометрического воздействия для работы сопла Лавалья по его прямому назначению недостаточно. Необходимо также наличие соответствующего перепада давления. Если перепад давления недостаточен, то в минимальном сечении канала не будет достигаться критическая скорость -

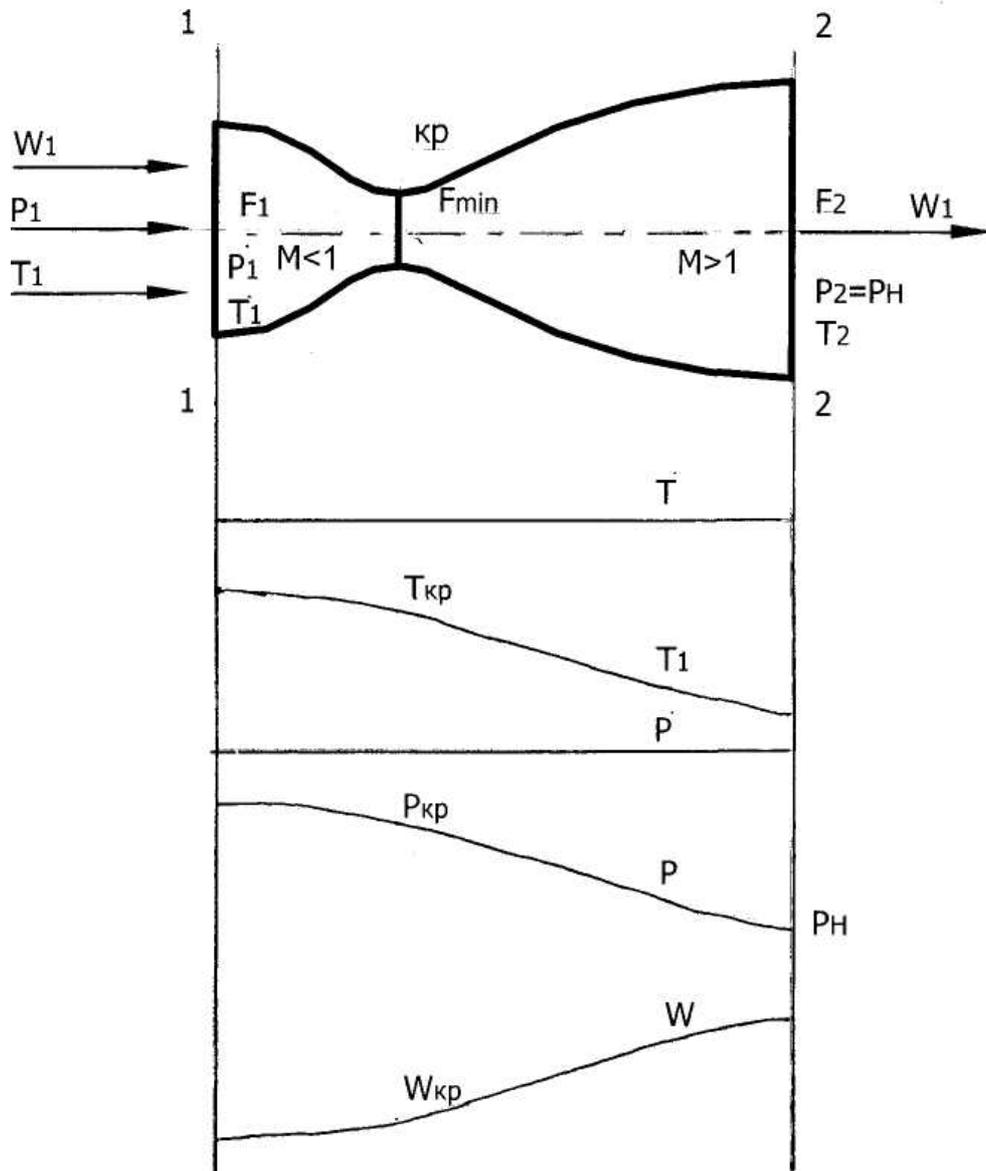
$W_{кр} = \alpha_{кр}$. В этом случае поток, не достигая скорости звука в критическом сечении, не переходит в сверхзвуковой и расширяющаяся часть канала работает, как диффузор, то есть в ней происходит торможение потока вместо разгона.

Следующим моментом, на который надо обратить внимание, является понятие расчетного режима работы сверхзвукового сопла. Для осуществления расчетного режима требуется выполнение двух условий:

- а) достижение скорости звука ($M = 1$) в минимальном сечении;

б) полное расширение газа на выходе из сопла ($P_2 = P_H$), где P_H - давление в среде, в которую происходит истечение газа.

Характер изменения параметров потока газа по длине сверхзвукового сопла на расчетном режиме его работы показан на рисунке 2.



P - давление;
 T - температура;
 W - скорость

Рисунок 2 - Характер изменения параметров потока газа по длине канала сверхзвукового сопла

Также важно хорошо понять связь между уширением сопла $\left(\frac{F_2}{F_{min}}\right)$ и параметрами потока на выходе из сопла (P_2, T_2, ρ_2, W_2). Для этого

рекомендуется рассмотреть зависимости для критической скорости течения газа ($W_{кр}$) и максимальной теоретической скорости течения газа из сверхзвукового сопла (W_{2max}) при полном расширении газа, то есть при $P_2 = P_H$.

При заданных условиях на входе в сопло (P_1^* и T_1^*) критическая скорость течения газа равна

$$W_{кр} = \sqrt{\frac{2K}{K+1} \cdot R \cdot T_1^*}, \quad (2)$$

где K - показатель адиабаты;

R - газовая постоянная, Дж/(кг · К);

T_1^* - температура заторможенного потока.

Максимальная теоретическая скорость истечения газа из сопла будет иметь место при $P_2 = P_H = 0$ (при истечении в вакууме) и бесконечно большом значении площади выходного сечения сопла (F_2)

$$W_{2max} = \sqrt{\frac{2K}{K+1} \cdot R \cdot T_1^*}, \quad (3)$$

Существенным является тот факт, что $W_{кр}$ и W_{2max} зависят (для данного рабочего тела, то есть при $K = const$ и $R = const$ только от температуры заторможенного потока и не зависят от давления.

При известных параметрах газового потока на входе в сопло (P_1^* , T_1^*) и давлении окружающей среды (P_H) можно определить уширение, потребное для обеспечения полного расширения.

Однако необходимо помнить, что одно и то же уширение $\left(\frac{F_2}{F_{min}}\right)$ имеют все подобные геометрические сопла. Следовательно, для определения абсолютных значений размеров сопла должен быть задан расход газа (G), который непосредственно связан с площадью минимального (критического) сечения

$$G = m \cdot \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} \cdot F_{min}, \quad (4)$$

где $m = \sqrt{\frac{K}{R} \cdot \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{K+1}{K-1}}}$ - газодинамическая константа;

F_{\min} - минимальная площадь проходного сечения сопла Лавалья, m^2 .

Большое значение для практики имеет работа в сопла Лавалья не расчетных условиях. Рассмотрим наиболее характерные случаи нерасчетных режимов работы сопла Лавалья.

Первый случай: пусть, например, происходит понижение давления в окружающей среде (P_H). Если перед этим соблюдался расчетный режим работы, то есть $P_2 = P_H$, то при снижении P_H сопло Лавалья переходит на нерасчетный режим работы (недорасширение газа в канале сопла). Однако ни в канале сопла, ни на его выходе никакого изменения параметров не происходит, причем все время соблюдается неравенство $P_2 > P_H$. Окончательное расширение газа до давления окружающей среды происходит за пределами канала сопла.

Второй случай: увеличение полного давления на входе в сопло (P_1^*) приводит к пропорциональному увеличению давления в потоке газа по всей длине канала сопла и, следовательно, к переходу сопла Лавалья на нерасчетный режим недорасширения $P_2 > P_H$. Кроме того, увеличение (P_1^*) приводит к увеличению расхода газа без изменения скорости истечения.

Напротив, понижение (P_1^*) приводит к тому, что сопло Лавалья не обеспечивает достижения критической скорости ($W_{кр}$) в минимальном сечении канала сопла (F_{\min}). В результате этого расширяющаяся часть сопла начинает работать как диффузор. Расход газа при этом уменьшается.

Третий случай: изменения T_1^* не приводят к изменению режима работы сопла. Однако численные значения скорости истечения и расхода газа изменяются, как это следует из формул (3).

$$W_2 = \sqrt{2 \frac{K}{K-1} \cdot R \cdot T_1^* \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1^*} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]}, \quad (5)$$

$$G = m \cdot \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} \cdot F_2 \cdot q(\lambda_2) = m \cdot \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} \cdot F_{\min}, \quad (6)$$

где $q(\lambda_2)$ - относительная плотность потока газа на выходе из сопла.

Ясно, что увеличение T_1^* приводит к увеличению W_2 и уменьшению G . Далее, если, не уменьшая угла раствора конической сверхзвуковой части

сопла, произвести ее укорочение, то уменьшится величина уширения $\left(\frac{F_2}{F_{\min}}\right)$.

В результате этого сопло перейдет на режим недорасширения ($P_2 > P_H > T_2 > T_H$). Расход газа при этом не изменится, а скорость истечения газа W_2 уменьшится. Такой характер изменения параметров при укорочении длины сопла сохраняется в пределах всей сверхзвуковой его части, то есть до мини-мального (критического) сечения.

При дальнейшем укорочении сопла Лавалья, то есть при переходе в дозвуковую часть сопла, происходит увеличение минимального, в данном случае выходного, сечения сопла. Это приводит к увеличению расхода газа. Режим истечения будет оставаться критическим. Расширение газа в канале сопла будет оставаться неполным (недорасширение газа).

Расчеты сопел обычно проводят с использованием газодинамических функций, аргументом которых является безразмерная скорость- λ :

$$\tau(\lambda) = \frac{T}{T^*} = 1 - \frac{L-1}{K+1} \cdot \lambda^2, \quad (7)$$

$$П(\lambda) = \frac{P}{P^*} = \left[1 - \frac{K-1}{K+1} \cdot \lambda^2\right]^{\frac{K}{K-1}}, \quad (8)$$

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{\rho}{\rho^*} = \left[1 - \frac{K-1}{K+1} \cdot \lambda^2\right]^{\frac{K}{K-1}}, \quad (9)$$

$$q(\lambda) = \frac{F_{\min}}{F} = \left(\frac{K+1}{2}\right) \left[1 - \frac{K-1}{K+1} \cdot \lambda^2\right]^{\frac{K}{K-1}} \cdot \lambda, \quad (10)$$

аргументом, которых является безразмерная скорость- λ

$$\lambda = \frac{W}{W_{кр}} = \frac{W}{\sqrt{\frac{2K}{K+1} \cdot R \cdot T_1^*}} = \frac{W}{\sqrt{K \cdot R \cdot T_{кр}}}. \quad (11)$$

Между числом Маха (М) и безразмерной скоростью λ имеется аналитическая связь

$$\lambda^2 = \frac{\frac{K+1}{2} \cdot M^2}{1 + \frac{K-1}{2} \cdot M^2}, \quad (12)$$

Использование в качестве аргумента газодинамических функций безразмерной скорости λ имеет то преимущество, что максимальная величина λ ограничена.

Так при $M \rightarrow \infty$ величина $\lambda \rightarrow \lambda_{\max}$.

$$\lambda^2 = \sqrt{\frac{K+1}{K-1}}, \quad (13)$$

1.2 Указания по построению профиля сопла Лавалья

Построение профиля сопла (профилирование) должно производиться с учетом необходимости получения минимальных потерь энергии, минимальных габаритов и веса. Профилирование сопла Лавалья включает в себя построение дозвукового и сверхзвукового участков.

По геометрической форме расширяющаяся часть сопла Лавалья подразделяется на конические (с прямолинейным контуром) и профилированные (с криволинейным контуром).

Конические сопла выполняются с постоянными углами раствора входного (дозвукового) и выходного (сверхзвукового) участков сопла. Углы конусности выбираются в следующих пределах:

- входного участка $\beta = 30^\circ - 60^\circ$,
- выходного участка $\alpha = 10^\circ - 15^\circ$.

Радиус закругления критического сечения r принимается равным $(0,8 - 1,0)d_{кр}$. (смотри рисунок 3).

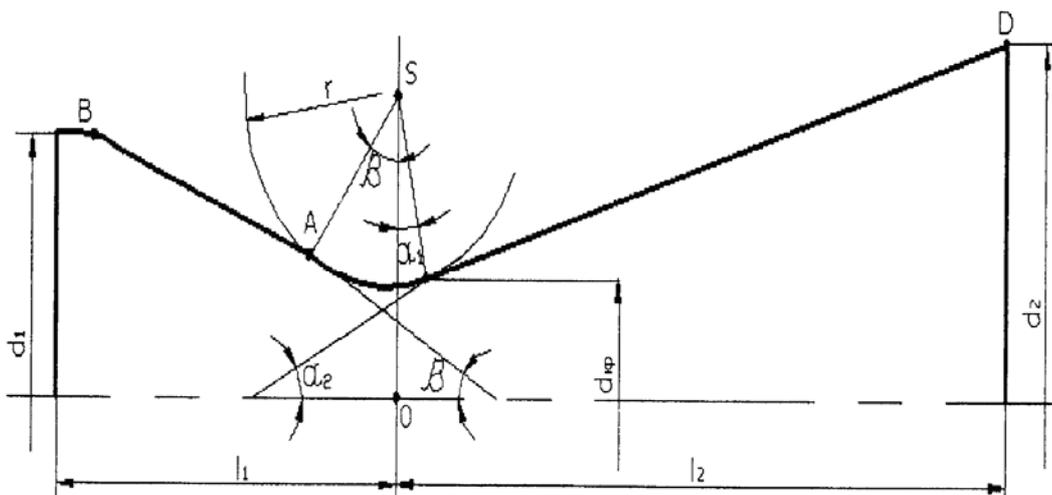


Рисунок 3 - Схема конического сопла Лавалья

Построение конического сопла Лаваля производится в следующей последовательности (рисунок 3):

а) откладывается в выбранном масштабе перпендикулярно к оси сопла отрезок $OS = r + \frac{d_{кр}}{2}$ и радиусом r проводится дуга окружности с центром в точке S ;

б) OS проводится отрезок SA и через точку A окружности проводится касательная AB , производится построение дозвуковой части сопла, для чего под углом β к перпендикуляру при этом точка B получается в результате пересечения касательной с уровнем диаметра d_1 ;

в) аналогичным образом производится построение сверхзвуковой части сопла.

У профилированных сопел контур сверхзвуковой части выполняется по параболе, в то время как дозвуковая часть остается конической. Угол конусности дозвукового участка принимается равным от 30° до 60° . Около критическая часть контура сопла образуется дугами двух окружностей, радиусы которых выбираются следующими:

- входного участка $r_1 = (0,7 - 0,8)d_{кр}$,

- выходного участка $r_2 = (0,20 - 0,25)d_{кр}$.

Длина сверхзвуковой части таких сопел принимается равной $\alpha_2 = (3 - 7)d_{кр}$. Углы наклона касательных к параболической дужке выбираются следующими:

- на входном участке $\alpha_1 = 20^\circ - 30^\circ$,

- на выходном участке $\alpha_2 = 3^\circ - 10^\circ$.

Построение профилированного сопла производится в следующей последовательности (в соответствии с рисунком 4):

а) откладывается в выбранном масштабе перпендикулярно к оси отрезок $OS_1 = r_1 + \frac{d_{кр}}{2}$ и радиусом r_1 проводится дуга окружности с центром в точке S_1 , образующая конический участок дозвуковой части сопла;

б) на построенном перпендикуляре откладывается отрезок $OS_2 = r_2 + \frac{d_{кр}}{2}$ и радиусом r_2 проводится дуга окружности с центром в точке S_2 , образующая начальный участок сверхзвуковой части сопла;

в) производится построение дозвуковой части сопла - таким же образом, как и у конического сопла;

г) производится построение сверхзвуковой части сопла, для чего:

1) под углом α_1 к перпендикуляру OS_2 проводится отрезок S_2C и через точку C окружности проводится касательная CE , при этом точка C является началом параболической дужки;

2) на оси сопла откладывается отрезок OF , равный длине сверхзвуковой

части сопла L_2 , и из точки F восстанавливается перпендикуляр FD; точка D получается в результате пересечения перпендикуляра с уровнем диаметра d_2 и является концом параболической дужки;

3) через точку D под углом α_2 к уровню диаметра d_2 проводится отрезок DE;

4) отрезки CE и ED разбиваются на одинаковое число частей и через точки деления проводятся соответствующие отрезки (1-1, 2-2, 3-3 и так далее), являющиеся касательными к вписываемой дужке параболы CD.

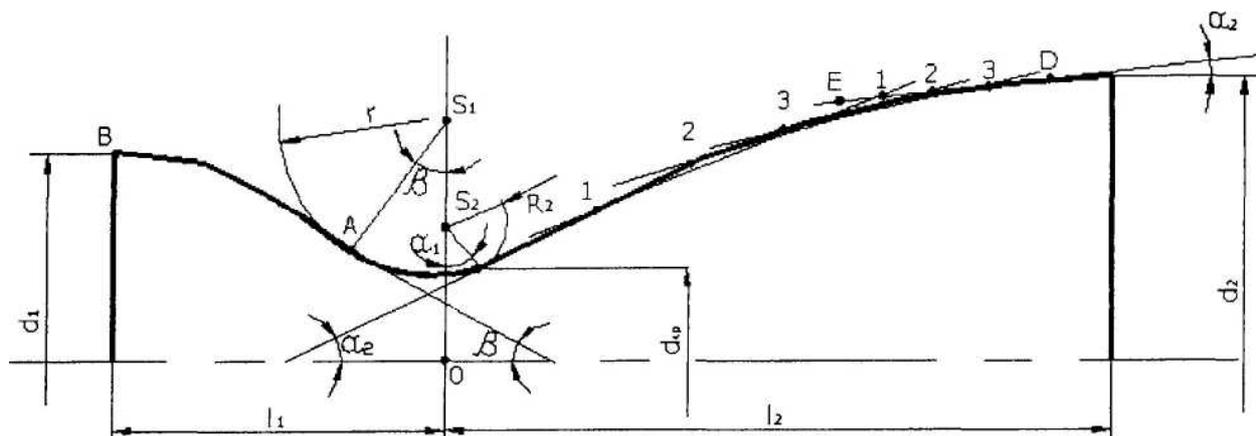


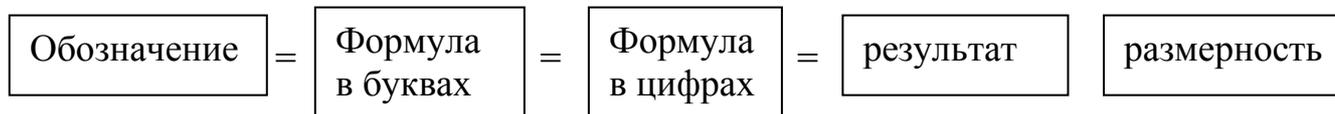
Рисунок 4 - Схема профилированного сопла Лавалья

1.3 Указание по оформлению пояснительной записки и графических материалов

При оформлении выполненной лабораторной работы задания необходимо придерживаться требований стандартов Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) к пояснительным запискам и графическим материалам и стандартом ОГУ СТП 101-00.

Студентам рекомендуется придерживаться следующих правил:

а) все вычисления записываются по следующей форме



Обозначения, входящие в формулы, применяемые при расчете, должны быть пояснены. Обозначения и цифровые значения величин, являющихся конечным результатом участка расчета выделяются в тексте (подчеркиваются). Вычисления ряда величин, определяемых по одной и той же формуле, выполняются в форме таблиц;

б) расчетные графики параметров состояния и профиль сопла Лавалья вычерчиваются по правилам машиностроительного черчения с использованием

легал без указания расчетных точек. При построении профиля сопла Лавалья вспомогательные построения необходимо оставить в виде тонких линий. Профиль сопла Лавалья рекомендуется выполнять на листах формата А3 (297x420) с указанием масштаба построения, выбранного в соответствии со стандартом. При этом его нужно выбирать по возможности большим, так как от этого зависит точность проведения расчетов. При выполнении графиков изменения параметров газа по длине сопла обязательно указывать цену делений, размерность и обозначаемую величину на обеих осях;

в) в пояснительной записке обязательно приводится подробный расчет критического, входного и выходного сечений сопла Лавалья. Расчеты параметров газа в остальных сечениях рекомендуется свести в таблицу. Для выполнения расчетов параметров газа с достаточной степенью точности необходимо использовать дополнительно не менее 2-х сечений в дозвуковой части сопла и 5-ти сечений в сверхзвуковой части сопла. В тексте пояснительной записки необходимо указать величину радиуса закругления (r), а также углы раствора дозвуковой (β) и сверхзвуковой (α) частей сопла, используемых при построении.

При выполнении расчетов нужно ограничиться не более чем тремя значащими цифрами. При использовании таблиц газодинамических функций для нахождения соответствующих величин обязательно следует проводить интерполяцию;

г) все графические материалы (если формат их более А4-го, то они должны быть предварительно обрезаны и сложены) сшиваются с текстом расчетов скрепками с левой стороны (количество скрепок не менее 2-х).

Лабораторная работа, выполненная аккуратно и без помарок, предъявляется на проверку преподавателю, и после получения визы "К защите" - защищается.

1.4 Подготовка к защите лабораторной работы

Перед защитой лабораторной работы необходимо:

а) проработать теоретический материал по учебной литературе и конспекту лекций;

б) продумать ответы на следующие вопросы:

1) Чем объясняется или чем обоснован закон изменения площади поперечного сечения сопла Лавалья?

2) Какой режим работы сопла Лавалья называется расчетным и какие условия должны выполняться для его осуществления?

3) Как изменяются параметры потока газа (T^* , T , p , p^* , W) по длине сопла Лавалья на расчетном режиме?

4) Дайте определение уширения сопла. Укажите формулу для определения уширения сопла.

5) Максимальная теоретическая скорость истечения газа из сопла $W_{2\max}$ (формула и физический смысл этой величины). Можно ли повлиять на ее значение? Если да, то каким образом?

6) От каких параметров зависит расход газа через сопло (формула и ее анализ)?

7) Критическая скорость течения газа - $W_{кр}$ (формула и физический смысл этой величины). Можно ли повлиять на ее значение? Если, да, то, каким образом?

8) Что представляют собой основные газодинамические функции (формулы и физический смысл каждой из них)?

9) Дайте определение чисел M и λ . Напишите их формулы. Есть ли между ними связь? Если да, то укажите ее?

10) Сходство и различие между числами M и λ . Величина λ_{max} (формула и физический смысл этой величины)?

11) Можно ли по величине $q(\lambda)$ однозначно определить значения параметров потока газа?

2 Методика расчета сопла Лавалья

2.1 Исходные данные

Расчет и построение сопла Лавалья выполняется при следующих исходных данных представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные

Условное обозначение	Наименование параметра	Величины
G	Расход газа	кг/с
T_1^*	Температура заторможенного потока газа на входе в сопло	К
P_1^*	Давление заторможенного потока газа на входе в сопло	Па
$P_2 = P_H$	Статическое давление потока газа на выходе из сопла	Па
$q(\lambda_1)$	Относительная плотность тока газа на входе в сопло	$q(\lambda_1)$
K	Показатель адиабаты	К
R	Газовая постоянная	$q(\lambda_1)$
m	Коэффициент расхода	$\sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{К}}{\text{Дж}}}$
β	Угол (до звукового) участка сопла Лавалья	$30^\circ - 60^\circ$
α	Угол выходного (сверхзвукового) участка сопла Лавалья	$10^\circ - 15^\circ$

2.2 Расчетная схема и обозначение сечений

Схема сопла Лавалья с обозначением расчетных сечений представлена на рисунке 5.

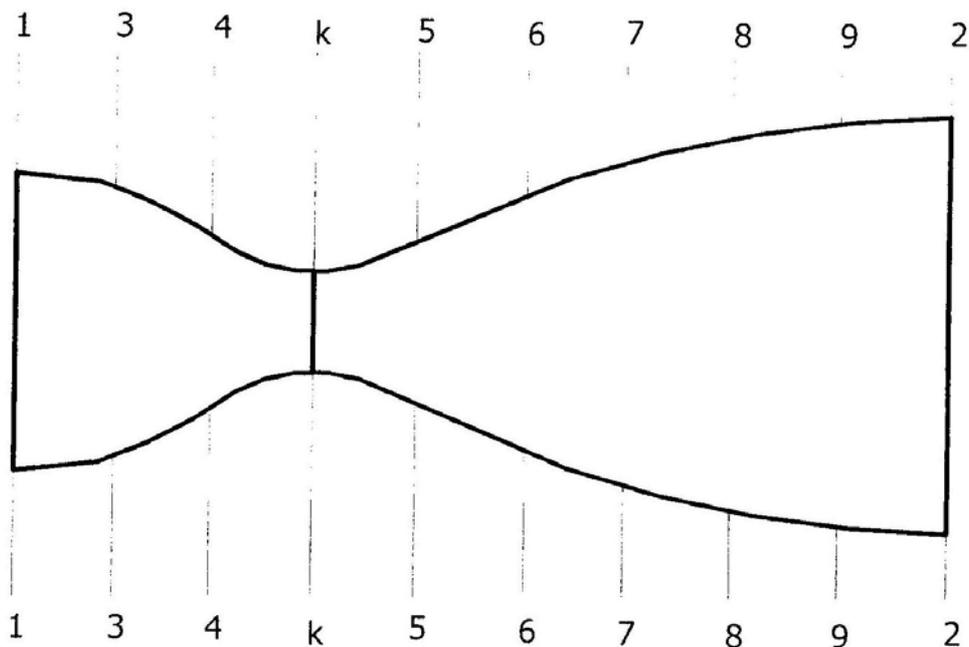


Рисунок 5 - Схема сопла Лавалья с обозначением расчетных сечений

2.3 Расчет основных сечений сопла

Расчет сопла Лавалья обычно проводят с использованием газодинамических функций (смотри раздел 1).

Площадь критического сечения сопла Лавалья

$$F_{кр} = \frac{G\sqrt{T_1^*}}{m \cdot P_1^* q(\lambda_{кр})}. \quad (14)$$

$$q(\lambda_1) = 1 \quad (\lambda_{кр} = 1 - \text{в критическом сечении})$$

Диаметр критического сечения сопла Лавалья

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{кр}}{\pi}}. \quad (15)$$

Размеры входного сечения сопла Лавалья

$$F_1 = \frac{F_{кр}}{q(\lambda_1)}, \quad (16)$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_1}{\pi}}. \quad (17)$$

Размеры выходного сечения сопла Лавалья

$$F_2 = \frac{F_{кр}}{q(\lambda_2)}, \quad (18)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_2}{\pi}}. \quad (19)$$

По таблицам газодинамических функций находим (при заданном значении K).

$$П(\lambda_2) = \frac{P_2}{P_1^*} = \left[1 - \frac{K-1}{K+1} \cdot \lambda_2^2 \right]^{\frac{K}{K-1}}, \quad (20)$$

$$П(\lambda_2) \rightarrow \lambda_2 \rightarrow q(\lambda_2)$$

2.4 Построение профиля сопла Лавалья

Профиль проточной части сопла Лавалья строится на миллиметровой бумаге по одному из методов, изложенных ранее, на основании расчетов по определению размеров основных сечений сопла Лавалья.

2.5 Определение параметров потока газа в канале сопла Лавалья

Расход газа во всех сечениях сопла Лавалья остается постоянным. Кроме того, остается постоянной температура «заторможенного» потока газа при изэнтропическом течение газа (при отсутствии потерь). Вследствие этого для любого произвольного сечения получаем

$$m \cdot \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} \cdot q(\lambda_i) \cdot F_i = m \cdot \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} \cdot q(\lambda_{кр}) \cdot F_{кр}, \quad (21)$$

Откуда

$$q(\lambda_i) = m \cdot \frac{F_{кр}}{F_i} q(\lambda_{кр}) = \left(\frac{d_{кр}}{d_i} \right)^2. \quad (22)$$

Для выбранных сечений 1 - 9 определяем газодинамическую функцию - $q(\lambda_i)$, а затем по соответствующим зависимостям находим безразмерные скорости λ и M , газодинамические функции τ , Π и ε .

$$q(\lambda_i) = \frac{F_{кр}}{F_i} = \left(\frac{K+1}{2} \right)^{\frac{1}{K-1}} \left[1 - \frac{K-1}{K+1} \cdot \lambda_i^2 \right]^{\frac{1}{K-1}} \lambda_i, \quad (23)$$

Откуда находим λ_i (по таблицам газодинамических функции или по гра-фику)

$$M_i = \sqrt{\frac{\frac{2}{K+1} \cdot \lambda_i^2}{1 - \left(\frac{K-1}{K+1} \right) \cdot \lambda_i^2}}, \quad (24)$$

$$\tau(\lambda_i) = 1 - \frac{K-1}{K+1} \cdot \lambda_i^2, \quad (25)$$

$$\Pi(\lambda_i) = \left[1 - \frac{K-1}{K+1} \cdot \lambda_i^2 \right]^{\frac{K}{K-1}}, \quad (26)$$

$$\varepsilon(\lambda_i) = \left[1 - \frac{K-1}{K+1} \cdot \lambda_i^2 \right]^{\frac{K}{K-1}}. \quad (27)$$

Скорость потока и статические параметры газа по длине сопла определяем по зависимостям

$$W_i = \lambda_i \cdot W_{кр}, \quad (28)$$

$$T_i = \tau(\lambda_i) \cdot T_i^*, \quad (29)$$

$$P_i = \Pi(\lambda_i) \cdot P_i^*, \quad (30)$$

$$\rho_i = \varepsilon(\lambda_i) \cdot \rho_i^*, \quad (31)$$

$$\text{где } \rho_i = \frac{P_i^*}{R \cdot T_i^*}. \quad (32)$$

Полученные данные сводим в таблицу А.1.

Графики изменения параметров потока газа по длине сопла Лавалья строим на основании полученных данных.

Список использованных источников

- 1 Коновалов, В.И. Техническая термодинамика/ В.И. Коновалов. - Изд. 2-е. – Иваново: [б,и.] 2005. - 620 с.
- 2 Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача/ В.В. Нащокин. - М.: Высшая школа, 1980. - 496 с.
- 3 Болгарский, А. В. Термодинамика и теплопередача/ А.В. Болгарский. - М.: Высшая школа, 1975. - 495 с.
4. Болгарский, А.В. Сборник задач по термодинамике и теплопередаче/ А.В. Болгарский. - М: Высшая школа, 1972. - 304 с.
- 5 Недужий, И.А. Техническая термодинамика и теплопередача/ И.А. Недужий, А.Н. Алабовский. - Киев: Высшая школа, 1981. - 248 с.
- 6 Кирилин, В.Л. Техническая термодинамика/ В.Л. Кирилин. - М.: Энергия, 1974. – 214 с.

Приложение А (справочное)

Таблица А.1 - Данные для построения графиков изменения параметров потока газа по длине сопла Лавалья

№ сечения	d_i	$d_{кр}/d_i$	$q(\lambda_i)$	λ_i	M_i	$\tau(\lambda_i)$	$\Pi(\lambda_i)$	$\varepsilon(\lambda_i)$	W_i	T_i	P_i	ρ_i
	м	-	-	-	-	-	-	-	м/с	К	Па	кг/м ³
1												
3												
4												
кр												
5												
6												
7												
8												
9												
2												