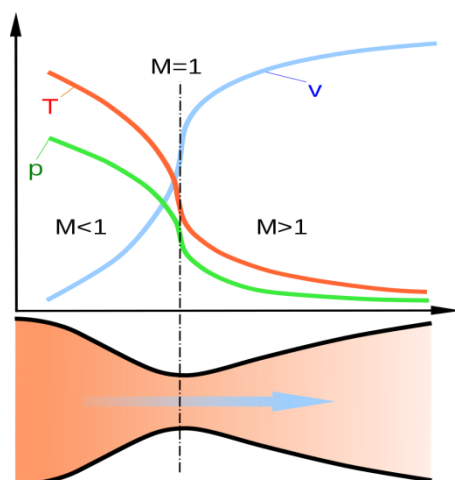


Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация)
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный
университет гражданской авиации»



Термодинамика и теплопередача

Методические указания

по выполнению курсовой работы

«Расчёт сопла Лавалья»

Для студентов 3Ф специализации

Специальности «Эксплуатация воздушных судов и
организация воздушного движения» специализации **ОрТОР**

Санкт-Петербург
2019

Одобрено и рекомендовано к изданию
Учебно-методическим советом Университета

Ш 87(03)

Термодинамика и теплопередача: Методические указания по изучению дисциплины и выполнению курсовой работы / Университет ГА. С.-Петербург, 2019

Издается в соответствии с программой дисциплины «Термодинамика и теплопередача».

Содержат общие методические указания, курсовое задание, пояснения к его выполнению, список литературы.

Предназначены для студентов 3Ф специальности «Эксплуатация воздушных судов и организация воздушного движения» специализации ОрТОР

Библ. 2 назв., табл. 3, рис. 2

Составитель А.И. Никифоров, ст. преп.

Рецензент Т.В Петрова, канд. техн. наук, доц.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Условные обозначения:

a - скорость звука, м/с;

d - диаметр, м;

f - площадь, м²

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - ускорение силы тяжести;

G - массовый расход, кг/с;

$k = C_p / C_v$ - показатель адиабаты;

ℓ - длина по оси сопла, м;

p - давление, Па;

R - газовая постоянная, Дж/(кг · К);

T - температура, К;

v - удельный объем, м³/кг;

c - скорость, м/с;

α - угол раскрытия сопла,

β - перепад давления;

ρ - плотность, кг/м³;

$M = c/a$ - число Маха, характеризует сжимаемость потока газа;

π - степень понижения давления.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИНДЕКСЫ

1 - расширяющаяся часть сопла;

2 - сужающаяся часть сопла;

вх - входное сечение;

вых - выходное сечение;

кр - критическое значение;

i - значение в i -м сечения сопла.

1. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Выполнение курсовой работы является завершающим этапом изучения дисциплины «Термодинамика и теплопередача» и подготовки к изучению дисциплин «Теория авиационных двигателей» и «Конструкция и прочность авиационных двигателей»

Современное состояние тенденции развития авиационного двигателестроения предъявляют повышенные требования к знаниям и навыкам инженеров эксплуатирующих авиационную технику. Выполнение курсовой работы позволяет студентам проверить свои способности применять полученные теоретические знания в проведении инженерных расчётов по расчету газовых потоков, освоить и закрепить навыки самостоятельной работы при выполнении конкретной инженерной задачи.

Задачей расчёта сопла Лаваля является определение по исходным данным профиля сопла и определения характера изменения параметров газового потока по длине сопла, сравнение полученных результатов с теоретическими положениями и законами газовой динамики.

Основными целями выполнения курсовой работы являются:

- закрепление и расширение знаний студентов, полученных при изучении дисциплины «Термодинамика и теплопередача»;
- проверка способности студентов применять полученные знания в инженерной деятельности;
- ознакомление студентов с методами поиска оптимальных вариантов при решении инженерных задач;
- обучение использованию знаний и умений, полученных при изучении смежных дисциплин, в процессе выполнения курсовой работы;
- привитие навыков использования вычислительной техники при решении конкретных инженерных задач;
- освоение навыков работы с научно-технической литературой и методов поиска информации;
- освоение и закрепление навыков самостоятельной творческой работы.

Расчёт сопла Лавалья производится по исходным данным согласно вариантов заданий (Таблицы 1,2) для выполнения курсовой работы.

Курсовая работа выполняется студентами самостоятельно. Выполненная курсовая работа оформляется в виде расчётно-пояснительной записки с приложенными к ней чертежами, схемами и другими результатами работы, выполненными в соответствии с выданным заданием.

Объём расчётно-пояснительной записки должен составить не менее 7 - 10 листов формата А4 (210×297 мм). Записка может быть выполнена как в рукописном виде, так и на компьютере. Компьютерный вариант более предпочтителен и позволяет автору претендовать на более высокую оценку.

Все листы расчётно-пояснительной записки должны быть пронумерованы. Номера следует располагать сверху справа листа. Первым листом является титульный, он не нумеруется, но учитывается в нумерации. На втором листе следует поместить содержание, затем – задание на курсовую работу.

На последней странице записки указывается литература, использованная при выполнении курсовой работы.

Графическая часть курсовой работы (построение продольного профиля сопла Лавалья, кривые изменения по длине сопла давления p , температуры T , плотности ρ) выполняется на листе бумаги формата А4 с соблюдением масштабов.

Выполненная курсовая работа в срок, установленный учебным планом, сдаётся преподавателю, который проверяет качество работы и её соответствие заданию.

Приём защиты курсовой работы производится преподавателем вне расписания учебных занятий. В процессе защиты преподавателем оцениваются:

- степень усвоения основного теоретического материала, связанного с выполнением задания;
- умение объяснить проведённые расчёты, обоснования принятых решений в ходе выполнения курсовой работы;
- самостоятельность выполнения курсовой работы и понимание принципов оптимизации параметров потока по длине сопла;

- умение пользоваться учебной и справочной литературой;
- качество оформления курсовой работы.

Положительная оценка за курс «Термодинамика и теплопередача» выставляется только при условии успешной защиты курсовой работы (не ниже, чем на оценку «удовлетворительно»). Студентам, получившим неудовлетворительную оценку на защите курсовой работы, устанавливается новый срок для подготовки и назначается повторная защита.

Небрежно оформленная курсовая работа, с диаграммами и схемами, выполненными “от руки”, не рассматривается и возвращается на доработку.

2. ЗАДАНИЕ НА РАСЧЁТ СОПЛА ЛАВАЛЯ

2.1. Исходные данные для расчёта:

1. Газовая постоянная воздуха $R = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; показатель адиабаты $k = 1,4$
2. Давление и температура воздуха на входе в сопло p_0^*, T_0^*
3. Давление воздуха на выходе из сопла p_c .
4. Расход воздуха через сопло G .
5. Углы раскрытия сопла α_1 (входная часть сопла), α_2 (выходная часть сопла)

Значения величин, указанных в п. 2-5, взять из табл.2 по варианту (см. табл.1).

Вариант выбирается согласно двум последним цифрам шифра. Для определения номера варианта следует найти в верхней горизонтальной строке цифру, соответствующую цифре десятков (предпоследняя цифра шифра), а в левом верхнем столбце – цифру, соответствующую единицам (последняя цифра шифра). На пересечении найденных вертикалей и горизонталей находится искомый номер варианта, на которую студент должен написать курсовую работу. Например, шифр студента ОрТОР – 0916.0125 вариант **8**.

2.2. Задание для расчёта.

Расчёт сопла Лавалья производится по исходным данным (см. табл. 1,2) по мере изучения программных материалов 8-й главы учебного пособия «Термодинамика и теплопередача. Раздел II. Основы газовой динамики ГТД» [1].

В ходе расчёта требуется:

1. Определить изменение параметров потока по длине сопла: давления p , температуры T , удельного объёма v , плотности ρ .
2. Определить изменения по длине сопла: скорости потока c , местной скорости звука a , числа Маха M .
3. Определить геометрические размеры сопла: длину ℓ , критический диаметр $d_{кр}$ (диаметр горловины), диаметр сопла на входе $d_{вх}$ диаметр сопла на выходе $d_{вых}$.
4. Построить в масштабе на миллиметровой бумаге кривые изменения по длине сопла: давления p , температуры T , плотности ρ , скорости потока c , скорости звука a .
Графики кривых расположить под продольным профилем сопла, вычерченными в масштабе.
5. Все расчёты приложить к выполненной работе. Результаты внести в сводную таблицу 3.
6. Проверка правильности расчётов и анализ полученных результатов
7. Защита курсовой работы.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КУРСОВОЙ РАБОТЫ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЁТА

3.1 Теоретические основы работы

Основные зависимости при исследовании процессов течения газов выводятся при анализе уравнения неразрывности, уравнения состояния газа и уравнения первого закона термодинамики, написанных для зафиксированных и подвижных осей координат. При этом газ считается идеальным, его течение происходящим без трения и энергообмена с окружающей средой ($Q_{внеш} = L_{внеш} = L_r = 0$). Следовательно, процесс изменения состояния газа при этих условиях будет адиабатным. Расчёт истечения начинают с определения области течения, которая может быть дозвуковой, звуковой, сверхзвуковой. Её находят

сравнением перепада давления с критическим перепадом, являющимся функцией свойств рабочего тела. Однако путём такого сравнения можно определить лишь возможность получения той или иной скорости. Чтобы эта возможность стала действительностью, необходима соответствующая форма сопла. Исходя из вышесказанного выводится уравнение профиля струи для энергоизолированного потока без трения [2], который имеет вид:

$$(M^2 - 1) \cdot \frac{dc}{c} = \frac{dF}{F} . \quad (1)$$

Это уравнение показывает величину dc , определяющую характер изменения скорости потока, с величиной dF , характеризующий изменение площади проходного сечения канала, т. е. его форму. Сопла – это каналы в которых скорость газа увеличивается ($dc > 0$). Сопла бывают дозвуковые и сверхзвуковые.

Канал, в котором достижима сверхзвуковая скорость, называется соплом Лавалю (по имени шведского инженера, предложившего это сопло для получения сверхзвуковой скорости в струе пара, работающей в турбине). Сопло Лавалю состоит из суживающейся и расширяющейся частей. В суживающейся части скорость увеличивается от начального значения (если истечение происходит из большого сосуда, $c=0$) до скорости, равной местной скорости звука; в расширяющейся части наблюдается дальнейшее увеличение скорости потока. Для уменьшения потерь энергии расширяющаяся часть соединяется с суживающейся плавным переходом – горловиной. Это минимальное сечение, в котором достигается скорость движения потока, равная местной скорости звука, называется критическим сечением, а параметры газа в этом сечении - критическими.

Режим течения определяется сравнением перепада давлений $\beta_i = p_i / p_o^*$ с критическим перепадом

$$\beta_{кр} = \frac{p_{кр}}{p_o^*} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2)$$

где p_i , $p_{кр}$ - статическое давление в i -м и критическом сечениях; p_0^* - полное давление на входе в сопло; k - показатель адиабаты.

Из формулы для $\beta_{кр}$ видно, что критическое отношение давлений не зависит от параметров торможения, а является только функцией физических свойств газа. В данном задании рабочее тело воздух, для которого $k = 1,4$ и, следовательно,

$$\beta_{кр}=0,528.$$

3.2. Порядок выполнения расчёта

1. В соответствии с номером варианта выписать из таблицы вариантов заданий, приведённых в таблице 2, параметры для выполнения задания.

2. Найти перепад давления в сопле $\beta_{вых} = p_c / p_0^*$ если:

- а) $\beta_{вых} > \beta_{кр}$ - дозвуковое истечение;
- б) $\beta_{вых} = \beta_{кр}$ - звуковое истечение;
- в) $\beta_{вых} < \beta_{кр}$ - сверхзвуковое истечение.

Сравнивая $\beta_{вых}$ и $\beta_{кр}$, определить режим истечения.

3. Для расчёта параметров газа в промежуточных сечениях сопла задаются текущие значения β_i в диапазоне $1 \geq \beta_i \geq \beta_{вых}$. Рекомендуются следующие значения β_i : 0,999; 0,99; 0,95; 0,9; 0,8; 0,528; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 0,05.

4. Определение параметров газа по длине сопла:

а) давление $p_i = \beta_i \cdot p_0^*$ (3)

б) температура $T_i = T_0^* \cdot \beta_i^{\frac{k-1}{1}}$ (4)

в) удельный объём находится с помощью уравнения состояния идеального газа

(уравнение Клапейрона): $v_i = \frac{R \cdot T_i}{p_i}$ (5)

г) плотность (величина, обратная удельному объёму): $\rho_i = \frac{1}{v_i}$ (6)

5. Скорость потока $c_i = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot (T_0^* - T_i)}$ (7)

6. Местная скорость звука $a_i = \sqrt{k \cdot R \cdot T_i}$ (8)

7. Число Маха – отношение местной скорости потока к скорости звука в нём:

$Ma = \frac{c_i}{a_i}$; отсюда если $Ma < 1$ - поток дозвуковой; $Ma = 1$ - поток звуковой; Ma

> 1 - поток сверхзвуковой.

8. Геометрические размеры сопла;

а) площадь поперечного сечения: $F_i = \frac{G}{\rho_i \cdot c_i}$ (9)

б) диаметр: $d_i = \sqrt{\frac{4}{3.14} F_i}$ (10)

в) длина (отсчитывается от критического сечения):

1) длина дозвуковой части сопла

$$\ell_1 = \frac{d_i - d_{кр}}{2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)} \quad (11)$$

2) длина сверхзвуковой части сопла

$$\ell_2 = \frac{d_i - d_{кр}}{2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha_2}{2}\right)} \quad (12)$$

3) общая длина сопла

$$\ell = \ell_1 + \ell_2 \quad (13)$$

9. Построить в масштабе сопло и под ним (см. рис.1.) кривые изменения давления температуры, плотности, скорости потока, местной скорости звука по длине сопла.

Таблица 1

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
4	31	32	33	34	35	1	2	3	4	5
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
7	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Таблица 2.

Варианты заданий для выполнения курсовой работы

№ п/п	$p_0^* \cdot 10^5 \text{Па}$	$T_0^* \text{К}$	$p_c^* \cdot 10^5 \text{Па}$	$G, \text{кг/с}$	$\alpha_1, \text{град}$	$\alpha_2, \text{град}$	$T_{\text{ст}}, \text{К}$
I	2	3	4	5	6	7	8
1	1	723	0,045	0,9	12	20	500
2	2	1000	0,08	2,0	14	22	600
3	3	1100	0,09	2,0	16	24	600
4	4	1200	0,16	3,8	18	26	700
5	5	1000	0,2	4,5	20	28	600
6	6	1000	0,24	5,4	12	30	600
7	7	1100	0,21	6,0	14	32	600
8	8	1300	0,32	6,5	16	34	700
9	9	1200	0,30	8,0	18	35	700
10	10	1200	0,36	8,0	20	38	700
11	1	1000	0,035	1,0	12	24	600

Продолжение таблицы 2

12	2	1800	0,09	1,5	14	28	800
13	4	1000	0,12	4,0	16	32	600
14	6	1300	0,18	5,5	18	36	600
15	8	1100	0,30	8,0	30	40	600
16	10	1000	0,4	9,0	12	26	600
17	1	1200	0,04	1,2	14	28	700
18	3	1000	0,1	3,0	16	30	500
19	5	1200	0,2	5,0	18	32	700
20	7	1200	0,28	7,0	20	34	700
21	9	1100	0,36	9,0	12	22	600
22	2	1200	0,07	1,8	14	24	700
23	4	800	0,14	4,0	16	28	500
24	6	1100	0,26	5,0	18	30	600
25	8	1100	0,36	7,0	20	32	500
26	10	1100	0,45	8,0	12	26	600
27	1,6	800	0,064	1,5	14	24	500
28	2,5	1000	0,1	2,0	16	28	600
29	3,5	1000	0,105	3,5	18	34	600
30	4,5	1200	0,18	4,0	20	30	700
31	5,5	1100	0,22	5,5	12	30	600
32	6,5	1200	0,26	6,0	14	34	700
33	7,5	1100	0,3	7,0	16	36	600
34	8,5	1000	0,255	8,0	18	28	600
35	9,5	1200	0,38	9,0	20	30	700

Таблица результатов вычислений

	№ сечения											
	Bx	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	B_{yx}
	$\beta = 0,999$	0,99	0,95	0,9	0,8	0,528	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,04 5
p_i МПа												
T_i , К												
v_i , м ³ /кг												
ρ_i кг/м ³												
c_i м/с												
a_i м/с												
M_i												
f_i мм ²												
d_i мм												
ℓ_i мм												

Образец оформления курсовой работы приведен на 16 стр. (приложение В).

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Никифоров. Термодинамика и теплопередача. Раздел II. Основы газовой динамики ГТД.– СПб.: СПбГУ ГА, 2014 – 158с.
2. Двигатели газотурбинные авиационные. Термины и определения. ГОСТ 23851 – 79. Государственный комитет СССР по стандартам. – М.: Издательство стандартов, 1978.

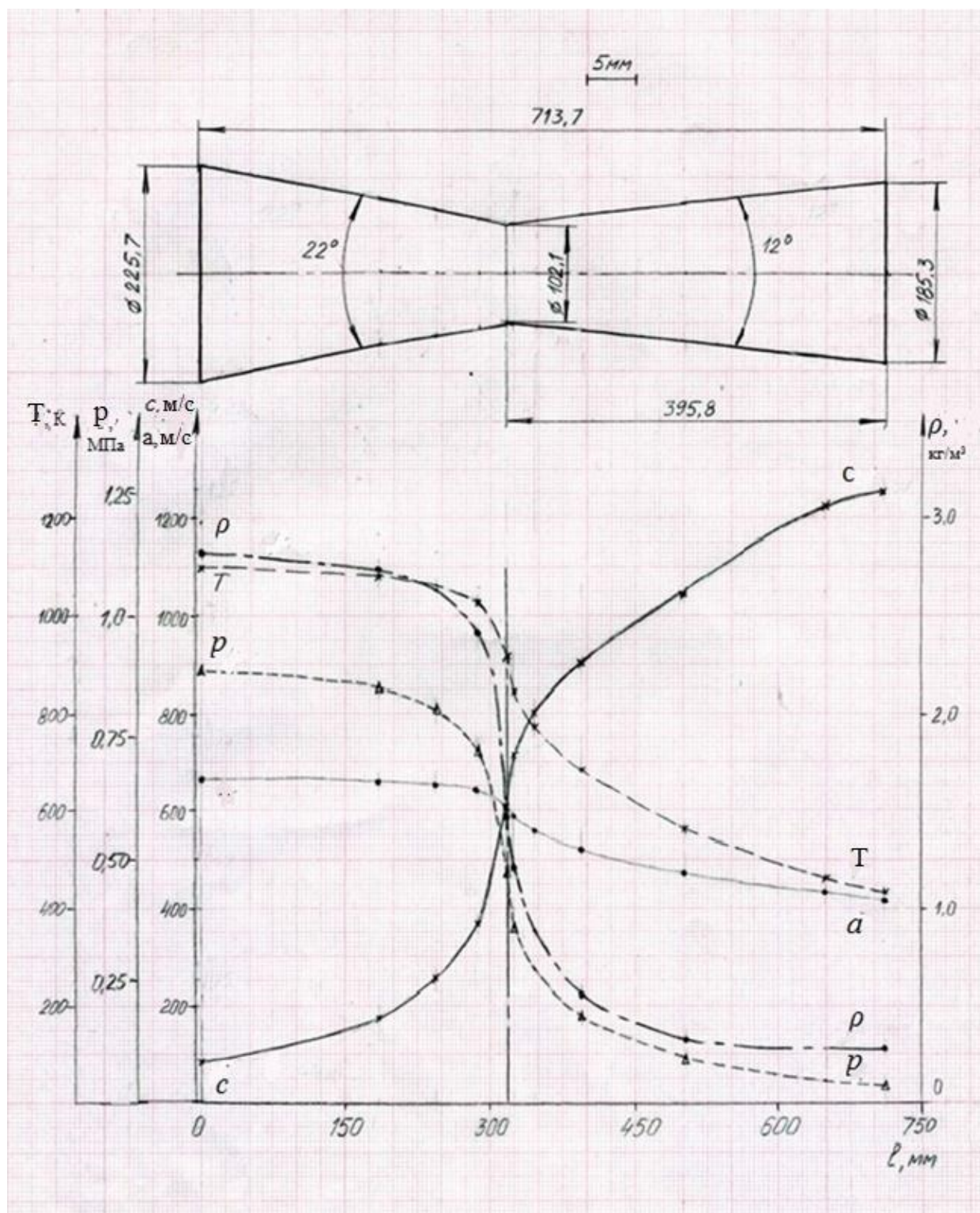


Рисунок 1. Чертёж расчётного сопла Лаваля, характер изменения параметров, скорости потока, местной скорости звука по длине сопла

Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация)
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет
гражданской авиации»

К у р с о в а я р а б о т а
по дисциплине “Термодинамика и теплопередача”
Тема: “ Расчёт сопла Лавалья ”

Выполнил

Пустырёв Е. В.

(Фамилия и инициалы)

(подпись)

Проверил

Никифоров А. И.

(Фамилия и инициалы)

(подпись)

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Основные условные обозначения.....	
Используемые индексы.....	
1. Теоретическая часть работы.....	
2. Задание на выполнение расчёта сопла Лавалья.....	
3. Порядок выполнения расчётов.....	
4. Выполнение расчёта.....	
4.1. Расчёты для входного сечения.....	
4.2. Расчёты для критического сечения.....	
4.3. Расчёты для выходного сечения	
4.4. Таблица результатов вычисления	
4.5. Графическая часть.....	

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Условные обозначения:

a - скорость звука, м/с;

d - диаметр, м;

f - площадь, м²

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - ускорение силы тяжести;

G - массовый расход, кг/с;

$k = C_p / C_v$ - показатель адиабаты;

ℓ - длина по оси сопла, м;

p - давление, Па;

R - газовая постоянная, Дж/(кг · К);

T - температура, К;

v - удельный объем, м³/кг;

c - скорость, м/с;

α - угол раскрытия сопла,

β - перепад давления;

ρ - плотность, кг/м³;

$M=c/a$ - число Маха, характеризует сжимаемость потока газа;

π -степень понижения давления.

$q(\lambda)$ -газодинамическая функция расхода газа

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИНДЕКСЫ

1 - расширяющаяся часть сопла;

2 - сужающаяся часть сопла;

$вх$ - входное сечение;

$вых$ - выходное сечение;

$кр$ - критическое значение;

i - значение в i -м сечения сопла.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Основные зависимости при исследовании процессов течения газов выводятся при анализе уравнения неразрывности, уравнения состояния газа и уравнения первого закона термодинамики, написанных для зафиксированных и подвижных осей координат. При этом газ считается идеальным, его течение происходящим без трения и энергообмена с окружающей средой ($Q_{внеш} = L_{внеш} = L_r = 0$). Следовательно, процесс изменения состояния газа при этих условиях будет адиабатным. Расчёт истечения начинают с определения области течения, которая может быть дозвуковой, звуковой, сверхзвуковой. Её находят сравнением перепада давления с критическим перепадом, являющимся функцией свойств рабочего тела. Однако путём такого сравнения можно определить лишь возможность получения той или иной скорости. Чтобы эта возможность стала действительностью, необходима соответствующая форма сопла. Исходя из вышесказанного выводится уравнение профиля струи для энергоизолированного потока без трения [2], который имеет вид:

$$(M^2 - 1) \cdot \frac{dc}{c} = \frac{dF}{F} . \quad (1)$$

Это уравнение показывает величину dc , определяющую характер изменения скорости потока, с величиной dF , характеризующий изменение площади проходного сечения канала, т. е. его форму. Сопла – это каналы в которых скорость газа увеличивается ($dc > 0$). Сопла бывают дозвуковые и сверхзвуковые.

Канал, в котором достижима сверхзвуковая скорость, называется соплом Лавалля (по имени шведского инженера, предложившего это сопло для получения сверхзвуковой скорости в струе пара, работающей в турбине). Сопло Лавалля состоит из суживающейся и расширяющейся частей. В суживающейся части скорость увеличивается от начального значения (если истечение происходит из большого сосуда, $c=0$) до скорости, равной местной скорости звука; в расширяющейся части наблюдается дальнейшее увеличение скорости потока. Для уменьшения потерь энергии расширяющаяся часть соединяется с

суживающейся плавным переходом – горловиной. Это минимальное сечение, в котором достигается скорость движения потока, равная местной скорости звука, называется критическим сечением, а параметры газа в этом сечении - критическими.

Режим течения определяется сравнением перепада давлений $\beta_i = p_i / p_0^*$ с критическим перепадом

$$\beta_{кр} = \frac{p_{кр}}{p_0^*} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2)$$

где p_i , $p_{кр}$ - статическое давление в i -м и критическом сечениях; p_0^* - полное давление на входе в сопло; k - показатель адиабаты.

Из формулы для $\beta_{кр}$ видно, что критическое отношение давлений не зависит от параметров торможения, а является только функцией физических свойств газа. В данном задании рабочее тело воздух, для которого $k = 1,4$ и, следовательно,

$$\beta_{кр} = 0,528.$$

2. ЗАДАНИЕ НА РАСЧЁТ СОПЛА ЛАВАЛЯ

Исходные данные для расчёта по варианту № (...):

1. Газовая постоянная воздуха $R = 287$ Дж/(кг · К); показатель адиабаты $k = 1,4$;
2. Давление и температура воздуха на входе в сопло $p_0^* = 2 \cdot 10^5$ Па, $T_0^* = 1800$ К;
3. Давление воздуха на выходе из сопла $p_c^* = 0,09 \cdot 10^5$ Па;
4. Массовый расход воздуха через сопло $G = 1,5$ кг/с ;
5. Углы раскрытия сопла α_1 (входная часть сопла) = 14 град , α_2 (выходная часть сопла) = 28 град.

В ходе расчёта требуется:

1. Определить изменение параметров потока по длине сопла: давления p , температуры T , удельного объёма v , плотности ρ .
 2. Определить изменения по длине сопла: скорости потока c , местной скорости звука a , числа Маха M .
 3. Определить геометрические размеры сопла: длину ℓ , критический диаметр $d_{кр}$ (диаметр горловины), диаметр сопла на входе $d_{вх}$, диаметр сопла на выходе $d_{вых}$.
 4. Используя полученные расчёты вычертить с соблюдением масштаба продольный профиль сопла Лавала.
- Затем под продольным профилем сопла построить (вычертить) с соблюдением масштаба кривые изменения по длине сопла: давления p , температуры T , плотности ρ , скорости потока c , скорости звука a .
5. Расчёты для входного, критического и выходных сечений приложить к выполненной работе.
 6. Проверка правильности расчётов и анализ полученных результатов
 7. Защита курсовой работы.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЁТА

1. В соответствии с номером варианта выписать из таблицы вариантов заданий, приведённых в таблице 2, параметры для выполнения задания.
 2. Найти перепад давления в сопле $\beta_{вых} = p_c / p_0^*$.
- Сравнивая перепад давления на выходе из сопла $\beta_{вых}$ с критическим перепадом давления $\beta_{кр}$ определить режим истечения:
- а) Если $\beta_{вых} > \beta_{кр}$ - истечение будет дозвуковым;
 - б) Если $\beta_{вых} = \beta_{кр}$ - истечение будет звуковым;
 - в) Если $\beta_{вых} < \beta_{кр}$ - истечение будет сверхзвуковым

3. Для расчёта параметров газа в промежуточных сечениях сопла задаются текущие значения β_i в диапазоне $1 \geq \beta_i \geq \beta_{\text{вых}}$. Рекомендуются следующие значения β_i : $\beta_{\text{вх}} = 0,999$; $\beta_1 = 0,99$; $\beta_2 = 0,95$; $\beta_3 = 0,9$; $\beta_4 = 0,8$; $\beta_5 = \beta_{\text{кр}} = 0,528$; $\beta_6 = 0,4$; $\beta_7 = 0,3$; $\beta_8 = 0,2$; $\beta_9 = 0,1$; $\beta_{10} = 0,05$.

$\beta_{\text{вых}}$ определить по формуле $\beta_{\text{вых}} = p_c / p_0^*$ согласно варианта задания.

4. Определение параметров газа по длине сопла:

а) давление $p_i = \beta_i \cdot p_0^*$ (3)

б) температура $T_i = T_0^* \cdot \beta_i^{\frac{k-1}{k}}$ (4)

в) удельный объём находится с помощью уравнения состояния идеального газа

(уравнение Клапейрона): $v_i = \frac{R \cdot T_i}{p_i}$ (5)

г) плотность (величина, обратная удельному объёму): $\rho_i = \frac{1}{v_i}$ (6)

5. Скорость потока: $c_i = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot (T_0^* - T_i)}$ (7)

6. Местная скорость звука: $a_i = \sqrt{k \cdot R \cdot T_i}$ (8)

7. Число Маха – отношение местной скорости потока к скорости звука в

нём: $M_i = \frac{c_i}{a_i}$; отсюда если

$M < 1$ - поток в этом сечении будет дозвуковым;

$M_i = 1$ - поток в этом сечении будет звуковым;

$M_i > 1$ - поток в этом сечении будет сверхзвуковым.

8. Геометрические размеры сопла:

а) площадь i -го поперечного сечения сопла: $F_i = \frac{G}{\rho_i \cdot c_i}$ (9)

б) диаметр i -го сечения сопла: $d_i = \sqrt{\frac{4}{3.14} F_i}$ (10)

в) длина соответствующей части сопла (отсчитывается от критического сечения):

1) длина дозвуковой части сопла

$$l_1 = \frac{d_i - d_{kp}}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)} \quad (11)$$

2) длина сверхзвуковой части сопла

$$l_2 = \frac{d_i - d_{kp}}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_2}{2}\right)} \quad (12)$$

3) общая длина сопла:

$$l = l_1 + l_2 \quad (13)$$

9. Построить в масштабе сопло и под ним кривые изменения давления, температуры, плотности, скорости потока, местной скорости звука по длине сопла.

4. ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЁТА

4.1. Расчёты для входного сечения

1. $\beta_{ex} = 0,999$.

2. Определение параметров газа во входном сечении:

а) давление: $p_{ex} = \beta_{ex} \cdot p_0^* = 0,999 \cdot 2 \cdot 10^5 = 199\,800 \text{ Па} (0,1998 \cdot 10^6 \text{ МПа})$

б) температура: $T_{ex} = T_0^* \cdot \beta_{ex}^{\frac{k-1}{k}} = 1800 \cdot 0,999^{0,286} = 1799,486 \text{ К}$

в) удельный объём находится с помощью уравнения состояния идеального газа

(уравнение Клапейрона): $v_{ex} = \frac{R \cdot T_{ex}}{p_{ex}} = \frac{287 \cdot 1799,486}{199\,800} = 2,585 \text{ м}^3/\text{кг}$

г) плотность (величина, обратная удельному объёму):

$$\rho_{ex} = \frac{1}{v_{ex}} = \frac{1}{2,585} = 0,387 \text{ кг/м}^3$$

3. Скорость потока:

$$C_{ex} = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot (T_0^* - T_{ex})} = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 287 \cdot (1800 - 1799,486)} = 32,134 \text{ м/с}$$

4. Местная скорость звука:

$$a_{ex} = \sqrt{k \cdot R \cdot T_{ex}} = \sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 1799,486} = 850,314 \text{ м/с}$$

5. Число Маха – отношение местной скорости потока в сечении к скорости звука в нём:

$$M_{ex} = \frac{C_{ex}}{a_{ex}} = \frac{32,134}{850,314} = 0,038, \text{ т.к. } M_{ex} < 1 - \text{поток в этом сечении (во входном) будет дозвуковым.}$$

6. Геометрические размеры сопла:

а) площадь ex -го поперечного сечения сопла:

$$F_{ex} = \frac{G}{\rho_{ex} \cdot C_{ex}} = \frac{1,5}{0,387 \cdot 32,134} = 0,121 \text{ м}^2$$

б) диаметр ex -го сечения сопла:

$$d_{ex} = \sqrt{\frac{4}{3,14} F_{ex}} = \sqrt{1,27 \cdot 0,121} = 0,393 \text{ м (393 мм)}$$

в) длина соответствующей части сопла (длина дозвуковой части сопла).

$$l_1 = \frac{d_{ex} - d_{кр}}{2 \cdot \operatorname{tg}(\frac{\alpha_1}{2})} = \frac{393 - 101}{2 \cdot \operatorname{tg}(7)} = 1189,075 \text{ мм}$$

4.2. Расчёты для критического сечения

$$1. \beta_{кр} = 0,528.$$

2. Определение параметров газа в критическом сечении:

$$\text{а) давление: } p_{кр} = \beta_{кр} \cdot p_0^* = 0,528 \cdot 2 \cdot 10^5 = 105\,600 \text{ Па (0,1056} \cdot 10^6 \text{ МПа)}$$

$$\text{б) температура: } T_{кр} = T_0^* \cdot \beta_{кр}^{\frac{k-1}{k}} = 1800 \cdot 0,528^{0,286} = 1499,498 \text{ К}$$

в) удельный объём находится с помощью уравнения состояния идеального газа

(уравнение Клапейрона): $v_{кр} = \frac{R \cdot T_{кр}}{p_{кр}} = \frac{287 \cdot 1499,498}{105\,600} = 4,075 \text{ м}^3/\text{кг}$

г) плотность (величина, обратная удельному объёму):

$$\rho_{кр} = \frac{1}{v_{кр}} = \frac{1}{4,075} = 0,245 \text{ кг/м}^3$$

3. Скорость потока:

$$C_{кр} = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot (T_0^* - T_{кр})} = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 287 \cdot (1800 - 1499,498)} = 776,987 \text{ м/с}$$

4. Местная скорость звука:

$$a_{кр} = \sqrt{k \cdot R \cdot T_{кр}} = \sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 1499,498} = 776,208 \text{ м/с}$$

5. Число Маха – отношение местной скорости потока в сечении к скорости звука в нём:

$$M_{кр} = \frac{c_{кр}}{a_{кр}} = \frac{776,987}{776,208} = 1,001, \text{ т.к. } M_{кр} = 1 \text{ - поток в этом сечении (в критическом)}$$

будет звуковым.

6. Геометрические размеры сопла:

а) площадь $кр$ -го поперечного сечения сопла:

$$F_{кр} = \frac{G}{\rho_{кр} \cdot C_{кр}} = \frac{1,5}{0,245 \cdot 776,987} = 0,008 \text{ м}^2$$

б) диаметр $кр$ -го сечения сопла:

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{4}{3,14} F_{кр}} = \sqrt{1,27 \cdot 0,008} = 0,101 \text{ м (101 мм)}$$

4.3. Расчёты для выходного сечения

1. $\beta_{вых} = p_c / p_0^* = 0,045$.

2. Определение параметров газа на выходе из сопла:

а) давление: $p_{вых} = \beta_{вых} \cdot p_0^* = 0,045 \cdot 2 \cdot 10^5 = 9000 \text{ Па (} 0,009 \cdot 10^6 \text{ МПа)}$

б) температура: $T_{вых} = T_0^* \cdot \beta_{вых}^{\frac{k-1}{k}} = 1800 \cdot 0,045^{0,286} = 741,466 \text{ К}$

в) удельный объём находится с помощью уравнения состояния идеального газа

$$\text{(уравнение Клапейрона): } v_{\text{вых}} = \frac{R \cdot T_{\text{вых}}}{p_{\text{вых}}} = \frac{287 \cdot 741,466}{9\,000} = 23,645 \text{ м}^3/\text{кг}$$

г) плотность (величина, обратная удельному объёму):

$$\rho_{\text{вых}} = \frac{1}{v_{\text{вых}}} = \frac{1}{23,645} = 0,042 \text{ кг/м}^3$$

3. Скорость потока:

$$C_{\text{вых}} = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R (T_0^* - T_{\text{вых}})} = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 287 \cdot (1800 - 741,466)} = 1458,285 \text{ м/с}$$

4. Местная скорость звука:

$$a_{\text{вых}} = \sqrt{k \cdot R \cdot T_{\text{вых}}} = \sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 741,466} = 545,821 \text{ м/с}$$

5. Число Маха – отношение местной скорости потока в сечении к скорости звука в нём:

$$M_{\text{вых}} = \frac{C_{\text{вых}}}{a_{\text{вых}}} = \frac{1458,285}{545,821} = 2,672, \text{ т.к. } M_{\text{вых}} > 1 - \text{поток в этом сечении (в выходном)}$$

будет сверхзвуковым.

6. Геометрические размеры сопла:

а) площадь *вых* – го поперечного сечения сопла:

$$F_{\text{вых}} = \frac{G}{\rho_{\text{вых}} \cdot C_{\text{вых}}} = \frac{1,5}{0,042 \cdot 1458,285} = 0,0245 \text{ м}^2$$

б) диаметр *вых*- го сечения сопла:

$$d_{\text{вых}} = \sqrt{\frac{4}{3,14} F_{\text{вых}}} = \sqrt{1,27 \cdot 0,0245} = 0,177 \text{ м (177 мм)}$$

в) длина соответствующей части сопла (длина сверхзвуковой части сопла).

$$l_2 = \frac{d_{\text{вых}} - d_{\text{кр}}}{2 \cdot \operatorname{tg}(\frac{\alpha_2}{2})} = \frac{177 - 101}{2 \cdot \operatorname{tg}(14)} = 152,41 \text{ мм}$$

7. Общая длина сопла:

$$l = l_1 + l_2 = 1189,075 + 152,41 = 1341,485 \text{ мм}$$

4.4. Таблица результатов вычислений

Таблица результатов расчётов сопла Лаваля

	№ сечения											
	Bx	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	B_{yx}
	$\beta=0,999$	0,99	0,95	0,9	0,8	0,528	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,045
p_i МПа	0,1998	0,198	0,19	0,18	0,16	0,1056	0,08	0,06	0,04	0,02	0,01	0,009
T_i , К	1799,486	1794,834	1773,787	1746,569	1688,715	1499,498	1385,038	1275,643	1135,971	931,692	764,149	741,466
v_i , м ³ /кг	2,585	2,602	2,679	2,785	3,029	4,075	4,969	6,102	8,151	13,37	21,931	23,645
ρ_i кг/м ³	0,387	0,384	0,373	0,359	0,33	0,245	0,201	0,164	0,123	0,075	0,046	0,042
c_i м/с	32,134	101,875	229,482	327,632	472,834	776,987	913,049	1026,369	1155,004	1320,769	1442,576	1458,285
a_i м/с	850,314	849,214	844,22	837,718	823,727	776,208	745,995	715,92	675,598	611,845	554,107	545,821
M_i	0,038	0,12	0,272	0,391	0,574	1,001	1,224	1,434	1,71	2,159	2,603	2,672
f_i мм ²	0,0245	0,0383	0,0175	0,0128	0,0096	0,0079	0,0081	0,0089	0,0105	0,0152	0,0226	0,0245
d_i мм	393	221	149	128	111	101	102	106	116	139	170	177
ℓ_i мм	1189.075	488.661	195.464	109.949	40.722	0	2.005	10.027	30.081	76.205	138.372	152.41

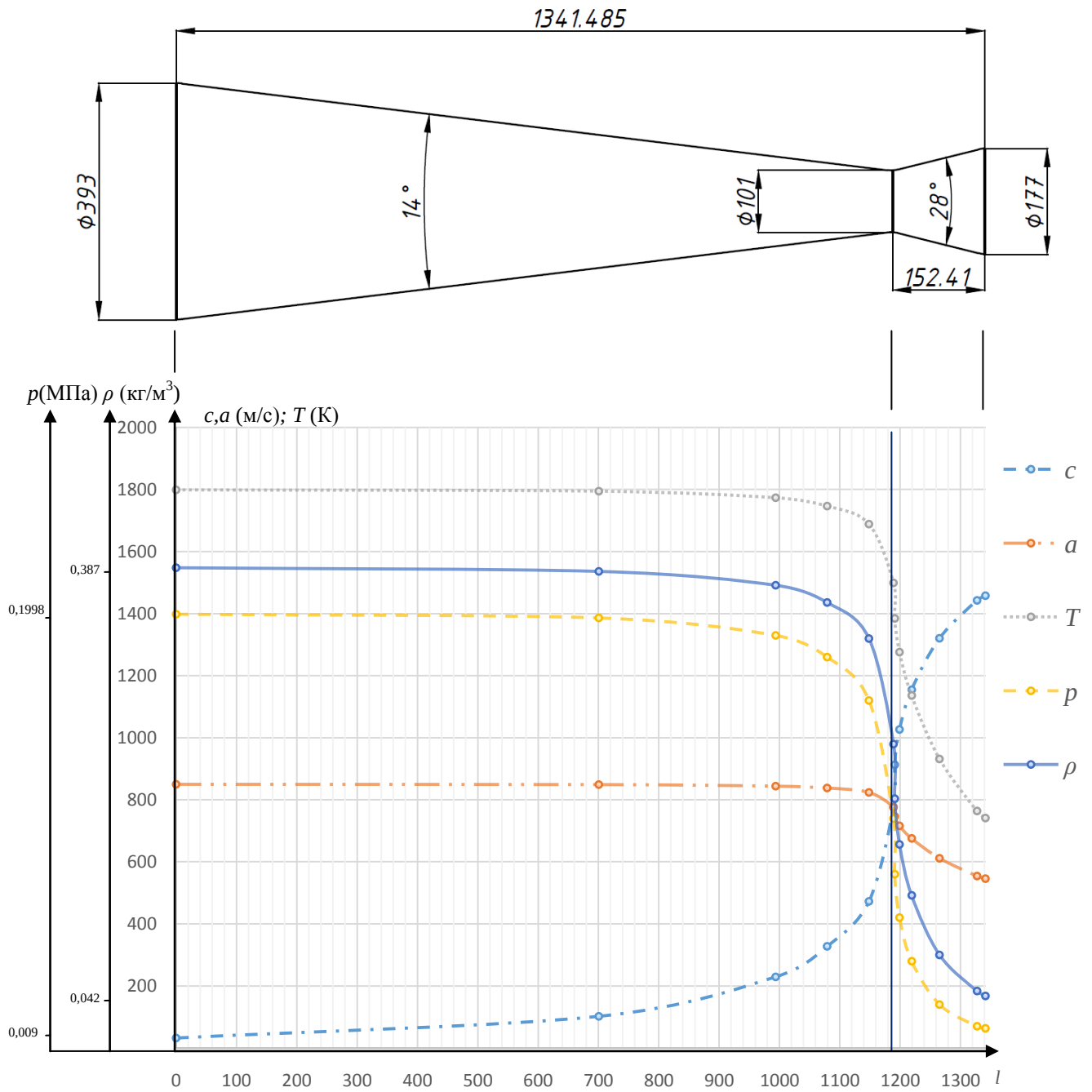


Рисунок 2. Чертёж расчётного сопла Лавеля и графики изменения по длине сопла: давления p , температуры T , плотности ρ , скорости потока c , скорости звука

Печатается в авторской редакции

Подписано к печати 22. 10. 2019. Формат бумаги 60х90 $\frac{1}{16}$.

Тираж 200. Уч.-изд.л.1,8. Усл.печ.л.2. Заказ 549 С 77

Тип. Университета ГА. 196210. С.-Петербург, ул. Пилотов, дом 38.