**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА**

**ФГБОУ ВО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ**

**УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»**

**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

Кафедра «Авиационной техники»

Термодинамика и теплопередача

Методические указания по выполнению курсовой работы

«Расчёт сопла Лаваля»

для студентов всех специальностей

Санкт-Петербург

2016

**Содержание**

Основные условные обозначения………………………………………………..3

Используемые индексы…………………………………………………………...3

1. Общие методические указания………………………………………………..4

2. Задание на выполнение расчёта сопла Лаваля………7

2.1. Исходные данные для расчёта……………………………………………….7

2.2. Задание для расчёта…………………………………………………………7

3.Теоретические основы курсовой работы и порядок выполнения расчётов……………………………………………………………………………9

3.1 Теоретические основы работы……………………………………………….9

3.2 Порядок выполнения расчётов……………………………………………...10

Таблица результатов вычислений…………………………………………........13

Список используемой литературы……………………………………………...14

Приложение А. Варианты заданий для выполнения курсовой работы…...15

Приложение Б. Образец титульного листа………………………………….17

Приложение В. Образец оформления графической части курсовой

работы (рис.1.)…………………………………………………………………18

**Основные условные обозначения**

Условные обозначения:
*а* - скорость звука, м/с;
*d -* диаметр, м;
*f*  - площадь, м2*g* = 9,81 м/с2 - ускорение силы тяжести; *G* - массовый расход, кг/с; *k* = C*p* /*Cυ*- показатель адиабаты; *ℓ -* длина по оси сопла, м;

*p* - давление, Па; *R* - газовая постоянная, Дж/(кг ⋅ К ); *Т* - температура, К; *υ -* удельный объем, м3/кг;
*c* - скорость, м/с; α - угол раскрытия сопла,
*β* - перепад давления;
*ρ* - плотность, кг/м3;
*М* = c/*а* - число Маха, характеризует сжимаемость потока газа;

*π*–степеньпонижения 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**

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.

Задание на выполнение курсовой работы выдается индивидуально каждому студенту преподавателем, ведущим дисциплину, и включает в себя:

1. Расчёт сопла Лаваля.

Расчёт сопла Лаваля производится по исходным данным согласно вариантовзаданий (Таблица 1) для выполнения курсовой работы.

Курсовая работа выполняется студентами самостоятельно по мере прохождения соответствующих тем наплановыхаудиторных лекционных и практических занятий при непосредственном руководстве со стороны ведущего данный предмет преподавателя.

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 Лаваля, кривые изменения по длине сопла давления *p,* температуры*Т*, 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 термодинамический расчёт сопла Лаваля.**

2.1 Исходные данные для расчёта.
1. Газовая постоянная воздуха R = 287 Дж/(кг ⋅ К ); показатель адиабаты *k* = 1,4.
2. Давление и температура воздуха на входе в сопло *p0\*, Т0\**
3. Давление воздуха на выходе из сопла *pс.*
4. Расход воздуха через сопло *G.*
5. Углы раскрытия сопла α1(входная часть сопла) ,α2(выходная часть сопла)
Значения величин, указанных в п. 2-5, взять из табл.1 по варианту.

2.2. Задание для расчёта.

Расчёт сопла Лаваля производится по исходным данным по мере изучения материалов II раздела (тема 8).

**В ходе расчёта требуется:**

1.Определить изменение параметров потока по длине сопла: давления *p*, температуры *Т*, удельного объёма *υ*, плотности *ρ*.
2. Определить изменения по длине сопла: скорости потока c, местной скорости звука *а*, числа Маха *М*.
3. Определить геометрические размеры сопла: длину *ℓ*, критический диаметр *dкр* (диаметр горловины), диаметр сопла на входе *dвх* диаметр сопла на выходе *dвых*.
4. Построить в масштабе на миллиметровой бумаге кривые изменения по длине сопла: давления*p*, температуры *Т*, плотности *ρ*, скорости потока *с*, скорости звука *а*.
Графики кривых расположить под продольным профилем сопла, вычерченными в масштабе.
5. Все расчёты приложить к выполненной работе. Результаты внести в сводную таблицу 2.

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 (*Qвнеш= Lвнеш = Lr = 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:

 . (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 Лаваля (по имени шведского инженера, предложившего это сопло для получения сверхзвуковой скорости в струе пара, работающей в турбине). Сопло Лаваля состоит из суживающейся и расширяющейся частей. В суживающейся части скорость увеличивается от начального значения (если истечение происходит из большого сосуда, с=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 *βi*=*рi* /*po\**с критическим перепадом

$βкр=\frac{p\_{кр}}{p\_{0}^{\*}}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ (2)

где *pi,, pкр* - статическое давление в *i*-м и критическом сечениях; *p0\*-* полноедавление навходе в сопло: *k* - показатель адиабаты.

Из формулы для *βкр* 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,

*βкр*=0,528.

**3.2. Порядок выполнения расчёта**

1. В соответствии с номером варианта выписать из таблицы вариантов заданий, приведённых в приложении П. 1., параметры для выполнения задания.
2. Найти перепад давления в сопле *βвых* = *pс / p0*\* если:

а) *βвых> βкр* - дозвуковое истечение;

б) *βвых = βкр*- звуковое истечение;

в) *βвых< βкр* - сверхзвуковое истечение.
Сравнивая *βвых и βкр*, определить режим истечения.
3. Для расчёта параметров газа в промежуточных сечениях сопла задаются текущие значения*βi* в диапазоне 1 ≥ *βi* ≥ *βвых*. Рекомендуются следующие значения *βi*: 1; 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 *рi= βi ·p0\** (3)
б) температура *Ti=T0\*·*$β\_{i}^{\frac{k-1}{1}}$ (4)
в) удельный объём находится с помощью уравнения состояния идеального газа (уравнение Клапейрона):$υ$*i* =$\frac{R·T\_{i}}{p\_{i}}$ (5)
г) плотность (величина, обратная удельному объёму): *ρi* = $\frac{1}{υ\_{i}}$ (6)
5. Скорость потока  (7)

6. Местная скорость звука *ai* =$\sqrt{k∙R∙T\_{i}}∙$ (8)

7. Число Маха – отношение местной скорости потока к скорости звука в нём: *M i*=$\frac{c\_{i}}{a\_{i}}$; отсюда если *M i* <1 - поток дозвуковой; *M i* = 1 - поток звуковой; *M i* > 1 - поток сверхзвуковой.
8. Геометрические размеры сопла;

а) площадь поперечного сечения: *Fi* =$\frac{G}{ρ\_{i}∙c\_{i}}$ (9)
б) диаметр: $d\_{i}=\sqrt{\frac{4}{3.14}Fi}$ (10)
 в) длина (отсчитывается от критического сечения):

1) длина дозвуковой части сопла

$l\_{1}=\frac{d\_{i}-d\_{кр}}{2∙tg·(\frac{α\_{1}}{2})}$ (11)

2) длина сверхзвуковой части сопла

$l\_{2}=\frac{d\_{i}-d\_{кр}}{2∙tg(\frac{a\_{12}}{2})}$ (12)

3) общая длина сопла

*ℓ=ℓ1+ℓ2* (13)

4) расчёт радиусов закругления
 *r1*=0,4*dвх*
 *r2*=0,5*dкр*

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

Таблица 1.

Таблица результатов вычислений

|  |  |
| --- | --- |
|  |  № сечения |
| *Вх* | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | *Вых* |
| β= 0,999 | 0,99 | 0,95 | 0,9 | 0,8 | 0,528 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,05 |  |
| *р*iМПа |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *Тi*, К |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $υ$i,м3/кг |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *ρi*кг/м3 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ciм/с |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *а*iм/с |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *М*i |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *f*iмм2 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *d*iмм |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *ℓ*iмм |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

**Список используемой литературы**

1. А. И. Никифоров. Термодинамика и теплопередача. Методические указания по выполнению курсовой работы «Термодинамический расчёт сопла Лаваля».– СПб.: СПбГУ ГА, 2014 – 15с.

2. А. И. Никифоров. Термодинамика и теплопередача. Раздел II. Основы газовой динамики ГТД.– СПб.: СПбГУ ГА, 2014 – 158с.

3. Двигатели газотурбинные авиационные. Термины и определения. ГОСТ 23851 – 79. Государственный комитет СССР по стандартам. – М.: Издательство стандартов, 1978.

Приложение А

Таблица 2.

Варианты заданий для выполнения курсовой работы

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № п/п | *р*0\*·105Па | *T*0\*К | *р*с\*·105Па | *G*, кг/с | *α*1, град | *α*2 ,град | *Т*ст, К |
| І | 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 |
| 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 |

Продолжение таблицы 2.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 |

Приложение Б

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

(МИНТРАНС РОССИИ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

(РОСАВИАЦИЯ)

ФГБОУ ВО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»

**Курсовая работа**

 **по дисциплине “Термодинамика и теплопередача”**

**Тема: “ Расчёт сопла Лаваля ”**

**Выполнил**

Пустырёв Е. В.

( (Фамилия и инициалы)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(подпись)

**Проверил**

 Никифоров А. И.

(Фамилия и инициалы)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(подпись)

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**

**2016 г.**

Приложение В



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