**ТИТУЛЬНИК**

**ЗАДАНИЕ**

**Содержание**

С.

[**Введение** 5](#_Toc96087005)

[**1 Расчет цикла ТВД.** 6](#_Toc96087006)

[**1.1** **Исходные данные.** 6](#_Toc96087007)

[**1.2 Расчет параметров вентилятора.** 7](#_Toc96087008)

[**1.3к Расчет параметров подпорной ступени.** 8](#_Toc96087009)

[**1.4к Расчет параметров компрессора.** 9](#_Toc96087010)

[**1.5 Расчет параметров турбины ВД.** 10](#_Toc96087011)

[**1.6 Расчет параметров свободной турбины.** 11](#_Toc96087012)

[**1.7 Расчет параметров двигателя.** 13](#_Toc96087013)

[**1.8 Выбор оптимальной степени повышения давления в компрессоре.** 14](#_Toc96087014)

[**2 Расчет турбины компрессора.** 15](#_Toc96087015)

[**2.1 Выбор частоты вращения ротора турбины.** 15](#_Toc96087016)

[**2.2 Расчёт меридионального сечения проточной части.** 16](#_Toc96087017)

[**2.3 Поступенчатый расчет турбины.** 18](#_Toc96087018)

[**2.4 Расчет параметров турбины.** 25](#_Toc96087019)

[**3 Определение параметров потока в трёх сечениях по высоте лопатки.** 26](#_Toc96087020)

[**3.1 Корневое сечение.** 27](#_Toc96087021)

[**3.2 Периферийное сечение** 28](#_Toc96087022)

[**4 Расчёт на прочность** 31](#_Toc96087023)

[**Заключение.** 36](#_Toc96087024)

[**Список использованной литературы.** 37](#_Toc96087025)

[**Приложение А** 38](#_Toc96087026)

[(обязательное) 38](#_Toc96087027)

[**Результаты расчета цикла ТВД при различных значениях степени повышения давления в компрессоре.** 38](#_Toc96087028)

[**Приложение Б** 40](#_Toc96087029)

[(обязательное) 40](#_Toc96087030)

[**Результаты поступенчатого расчета турбины компрессора.** 40](#_Toc96087031)

[**Таблица Б.1 -** Результаты поступенчатого расчета турбины компрессора. 40](#_Toc96087032)

[**Приложение В** 42](#_Toc96087033)

[(обязательное) 42](#_Toc96087034)

[**Результаты расчета параметров потока по высоте лопатки при различных законах профилирования.** 42](#_Toc96087035)

[**Приложение Г** 43](#_Toc96087036)

[(справочное) 43](#_Toc96087037)

[**Результаты поступенчатого расчета турбины компрессора при выборе различных вариантов исходных параметров.** 43](#_Toc96087038)

[**Таблица Г.1 -** Результаты поступенчатого расчета турбины компрессора при выборе различных вариантов исходных параметров. 43](#_Toc96087039)

# **Введение**

В рамках данного курсового проекта необходимо спроектировать турбину высокого давления для турбовинтового газотурбинного двигателя.

Турбина – лопаточная машина, в проточной части которой осуществляется преобразование кинетической и внутренней энергии, проходящего через нее рабочего тела, в механическую работу на валу. Назначение турбины высокого давления авиационного газотурбинного двигателя – привод компрессора высокого давления.

К турбине высокого давления авиационного двигателя предъявляют следующие требования: надежная работа на установившихся и переходных режимах, малая масса, безотказная работа в пределах заданного ресурса, сохранение в пределах заданных диапазонов основных параметров: расхода рабочего тела, степени понижения давления, расхода топлива. Турбина должна быть пригодна для ремонта, проста в техническом обслуживании, технологична.

# **1 Расчет цикла ТВД.**

## **Исходные данные.**

Тяга двигателя:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Степень двухконтурности:   |  |  | | --- | --- | |  |  | |  |

Температура газа перед турбиной:

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

Режим – взлетный ()

Коэффициент полного давления на входе:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

Коэффициент полного давления на выходе:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

Коэффициент, учитывающий гидравлические потери между ТК и ТС:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

Политропический КПД компрессора:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

Коэффициент полноты горения:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

Коэффициент полного давления в КС:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

Политропический КПД турбины компрессора:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

Политропический КПД силовой турбины:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

Механический КПД:

|  |  |
| --- | --- |
| . |  |

## **1.2 Расчет параметров вентилятора.**

В записке приведен расчет цикла для .

Параметры на входе в компрессор:

Давление на входе в двигатель: .

Температура на входе в двигатель: .

**Первое приближение:**

Принимаем: .

Адиабатический КПД вентилятора

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

Температура за вентилятором

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

Средняя теплоёмкость процесса сжатия:

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

Показатель адиабаты:

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

**Второе приближение:**

Адиабатический КПД вентилятора:

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

Температура за вентилятором:

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

Средняя теплоёмкость процесса сжатия:

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

Удельная работа вентилятора:

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

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **1.3к Расчет параметров подпорной ступени.** **Первое приближение:**  Принимаем: .  Адиабатический КПД подпорной ступени:   |  |  | | --- | --- | |  |  |   Температура за подпорной ступенью:   |  |  | | --- | --- | |  |  |   Средняя теплоёмкость процесса сжатия:   |  |  | | --- | --- | |  |  |   Показатель адиабаты:   |  |  | | --- | --- | |  |  |   **Второе приближение:**  Адиабатический КПД подпорной ступени:   |  |  | | --- | --- | |  |  |   Температура за подпорной ступенью:   |  |  | | --- | --- | |  |  |   Средняя теплоёмкость процесса сжатия:   |  |  | | --- | --- | |  |  |   Удельная работа подпорной ступени:   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | **1.4к Расчет параметров компрессора.** **Первое приближение:**  Принимаем: .  Адиабатический КПД компрессора:   |  |  | | --- | --- | |  |  |   Температура за компрессором:   |  |  | | --- | --- | |  |  |   Средняя теплоёмкость процесса сжатия:   |  |  | | --- | --- | |  |  |   Показатель адиабаты:   |  |  | | --- | --- | |  |  |   **Второе приближение:**  Адиабатический КПД компрессора:   |  |  | | --- | --- | |  |  |   Температура за компрессором:   |  |  | | --- | --- | |  |  |   Средняя теплоёмкость процесса сжатия:   |  |  | | --- | --- | |  |  |   Удельная работа компрессора:   |  |  | | --- | --- | |  |  | |  | |  |

## **1.5 Расчет параметров турбины ВД.**

Расход топлива:

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

Коэффициент избытка воздуха:

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

Расход на утечки: 

Относительный расход газов через турбину:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Удельная работа турбины компрессора:   |  |  | | --- | --- | |  |  | |  |

**Первое приближение:**

Принимаем: 

Теплоёмкость:

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

Температура за турбиной компрессора:

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

**Второе приближение:**

Средняя теплоёмкость:

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

Температура за турбиной компрессора:

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

Показатель адиабаты:

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

Степень понижения давления в турбине компрессора:

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

КПД турбины по параметрам торможения:

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

Полное давление за турбиной компрессора:

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

## **1.6 Расчет параметров ТНД.**

Полное давление на выходе:

**Первое приближение:**

Принимаем: 

Теплоёмкость:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Уравнение баланса мощности вентилятора:   |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | | Степень понижения давления в свободной турбине:   |  |  | | --- | --- | |  |  | |  | |  |

КПД турбины по параметрам торможения:

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

Температура за турбиной:

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

**Второе приближение:**

Средняя теплоёмкость:

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

Показатель адиабаты:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Уравнение баланса мощности вентилятора:   |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | Степень понижения давления в свободной турбине:   |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | | КПД турбины по параметрам торможения:   |  |  | | --- | --- | |  |  | |  | |  | |  |

Температура за турбиной:

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

Удельная работа силовой турбины:

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

## **1.7 Расчет параметров двигателя.**

Удельная тяга 1 ого контура:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Удельная тяга 2 ого контура:   |  |  | | --- | --- | |  |  | |  |

Удельная сила тяги, отнесенная к расходу воздуха через внутренний (первый) контур:

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

Суммарная тяга:

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

Удельный расход топлива:

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

Расход топлива через 1ый контур:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Расход топлива через 2ый контур:   |  |  | | --- | --- | |  |  | |  |

Расход топлива через компрессор:

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

## **1.8 Выбор оптимальной степени повышения давления в компрессоре.**

В пунктах 1.1 – 1.5 приведен расчет цикла для . Аналогично был проведен расчет при различных значениях . Результаты расчета приведены в приложении А.

Определим оптимальную степень повышения давления по зависимостям удельного расхода топлива и расхода воздуха на входе в компрессор от степени повышения давления (рисунок 1).

Выбираем оптимальное значение: .

|  |
| --- |
|  |
| *Рисунок 1. Зависимость удельного расхода топлива и удельной от степени повышения давления в компрессоре.* |

# **2 Расчет турбины компрессора.**

## **2.1 Выбор частоты вращения ротора турбины.**

Задаёмся скоростью за турбиной: 

Располагаемый теплоперепад:

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

Температура за турбиной:

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

Давление за турбиной:

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

Степень понижения давления:

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

Удельный объем:

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

Площадь кольцевого сечения:

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

Предел длительной прочности в рабочих лопатках: 

Коэффициент формы лопатки: 

Максимальная частота вращения:

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

Принимаем: 

## **2.2 Расчёт меридионального сечения проточной части.**

Профиль меридионального сечения турбины: `

Принимаем относительную длину рабочей лопатки последней ступени: 

Средний диаметр последней ступени:

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

Длина лопатки:

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

Окружная скорость на среднем диаметре:

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

Условная адиабатная скорость:

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

Коэффициент использования скорости: 

Оптимальное отношение: 

Число ступеней:

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

Принимаем: 

Коэффициент возврата теплоты:

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

Распределение теплоперепада по ступеням турбины:

Первая ступень:

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

Вторая ступень:

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

Степень реактивности в первой ступени: 

Степень реактивности во второй ступени: 

Располагаемый теплоперепад в СА первой ступени :

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

Принимаем угол потока за СА первой ступени: 

Принимаем коэффициент скорости: 

Скорость за СА первой ступени:

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

Температура за СА первой ступени:

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

Давление за СА первой ступени:

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

Удельный объем:

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

Длина сопловой лопатки первой ступени на выходе:

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

Длины рабочих и сопловых лопаток по ступеням:

Первая ступень:

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

Вторая ступень:

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

Ширина рабочих лопаток:

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

Ширина сопловых лопаток:

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

Осевой зазор за сопловыми лопатками:

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

Осевой зазор за рабочими лопатками:

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

## **2.3 Поступенчатый расчет турбины.**

**Расчет второй ступени:**

В расчетно - пояснительной записке приведен расчет второй ступени турбины. Первая ступень была рассчитана аналогично, результаты расчета даны в приложении Б.

Данные из расчета первой ступени:

Температура торможения перед второй ступенью: 

Полное давление перед второй ступенью: 

Угол потока на входе в СА второй ступени: 

Принимаем коэффициент скорости: 

Средняя условная температура второй ступени:

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

Средняя теплоемкость:

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

Располагаемый теплоперепад второй ступени:

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

Располагаемый теплоперепад в СА:

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

Скорость за СА:

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

Температура за СА:

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

Температура в конце адиабатного расширения в СА:

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

Давление перед рабочими лопатками:

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

Кольцевая площадь сечения перед рабочими лопатками:

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

Удельный объем:

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

Осевая составляющая скорости перед рабочими лопатками:

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

Угол потока на выходе из СА:

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

Окружная составляющая скорости на входе в рабочие лопатки:

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

Относительная скорость на входе в рабочие лопатки:

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

Угол входа потока на рабочие лопатки:

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

Теплоперепад в рабочем колесе:

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

Принимаем коэффициент скорости в рабочих лопатках: 

Относительная скорость на выходе с рабочих лопаток:

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

Температура за рабочими лопатками:

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

Температура в конце адиабатного расширения в рабочих лопатках:

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

Давление за рабочими лопатками:

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

Удельный объем за рабочими лопатками:

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

Кольцевая площадь сечения за рабочими лопатками:

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

Осевая составляющая скорости за рабочими лопатками:

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

Угол выхода потока с рабочих лопаток в относительном движении:

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

Окружная составляющая абсолютной скорости потока за рабочими лопатками:

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

Угол выхода потока с рабочих лопаток:

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

Абсолютная скорость на выходе с рабочих лопаток:

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

Работа на окружности рабочего колеса:

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

КПД на окружности рабочего колеса:

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

Удельные потери в СА:

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

Удельные потери в СА с учетом их использования в рабочих лопатках:

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

Относительные потери в СА:

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

Относительные потери в СА с учетом их использования в рабочих лопатках:

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

Удельные потери в рабочих лопатках:

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

Относительные потери в рабочих лопатках:

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

Удельные потери с выходной скоростью:

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

Относительные потери с выходной скоростью:

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

КПД на окружности рабочего колеса:

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

Удельные потери в радиальном зазоре:

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

Относительные потери с выходной скоростью:

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

Удельная работа ступени с учетом потерь в радиальном зазоре:

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

Затраты мощности на трение и вентиляцию:

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

Удельные потери на трение и вентиляцию:

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

Относительные потери на трение и вентиляцию:

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

Мощностной КПД ступени:

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

Лопаточный КПД ступени:

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

Удельная работа ступени:

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

Температура за ступенью:

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

Температура торможения за ступенью:

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

Давление торможения за ступенью:

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

Располагаемый теплоперепад во второй ступени по параметрам торможения:

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

КПД ступени по параметрам торможения:

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

**Уточнение коэффициентов скорости .**

**Коэффициент скорости .**

Потери трения в решетке:

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



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

Хорда лопатки:

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

Оптимальный относительный шаг:

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

Шаг решетки:

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

Число лопаток:

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

Принимаем: .

Шаг решетки:

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

Размер горла СА:

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

Относительная толщина: 

Толщина выходной кромки:

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

Относительные кромочные потери в СА:

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

Профильные потери в СА:

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

Концевые потери:

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

Коэффициент скорости:

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

**Коэффициент скорости .**

Потери трения в решетке:

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



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

Хорда лопатки:

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

Относительный шаг решетки:

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

Шаг решетки:

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

Число лопаток:

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

Принимаем: .

Размер горла:

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

Относительная толщина: 

Толщина выходной кромки:

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

Относительные кромочные потери в РК:

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

Профильные потери в РК:

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

Концевые потери:

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

Коэффициент скорости:

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

## **2.4 Расчет параметров турбины.**

Удельная работа турбины:

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

Располагаемый теплоперепад в турбине:

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

Мощностной КПД турбины:

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

Лопаточный КПД турбины:

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

Располагаемый теплоперепад в турбине по параметрам торможения:

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

Мощностной КПД турбины по параметрам торможения:

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

Мощность турбины:

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

В приложении Б приведены результаты поступенчатого расчета первой и второй ступени турбины компрессора.

В приложении Г приведены варианты расчета при различном выборе меридионального сечения проточной части, распределения теплоперепада по ступеням, степеней реактивности в первой и второй ступени, угла  на выходе из СА первой ступени, относительной длины рабочей лопатки последней ступени.

# **3 Определение параметров потока в трёх сечениях по высоте лопатки.**

Первая и вторая ступени турбины спрофилированы по закону профилирования .

Ниже приведен расчёт второй ступени, первая рассчитана аналогично. Результаты расчета первой и второй ступени турбины при законах профилирования и приведены в приложении В.

Окружные скорости на среднем радиусе:

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

Окружные скорости в корневом сечении:

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

Окружные скорости на периферии:

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

Числа Маха:

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

## **3.1 Корневое сечение.**

Осевая составляющая скорости:

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

Окружная составляющая скорости:

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

Скорость за СА:

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

Давление:

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

Степень реактивности:

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

Угол потока на входе в РК в относительном движении:

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

Окружная составляющая скорости за РК:

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

Относительная скорость на входе в РК:

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

Теплоперепад в РК:

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

Относительная скорость за РК:

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

Окружная составляющая относительной скорости за РК:

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

Осевая составляющая абсолютной скорости за РК:

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

Полная абсолютная скорость за РК:

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

Угол выхода потока из РК в относительном движении:

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

Угол выхода потока из РК в абсолютном движении:

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

Число Маха по абсолютной скорости на выходе из СА:

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

## **3.2 Периферийное сечение**

Осевая составляющая скорости:

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

Окружная составляющая скорости:

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

Скорость за СА:

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

Давление:

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

Степень реактивности:

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

Угол потока на входе в РК в относительном движении:

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

Окружная составляющая скорости за РК:

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

Относительная скорость на входе в РК:

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

Теплоперепад в РК:

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

Относительная скорость за РК:

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

Окружная составляющая относительной скорости за РК:

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

Осевая составляющая абсолютной скорости за РК:

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

Полная абсолютная скорость за РК:

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

Угол выхода потока из РК в относительном движении:

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

Угол выхода потока из РК в абсолютном движении:

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

# **4 Расчёт на прочность**

В качестве расчёта на прочность принята рабочая лопатка второй ступени ТВД.

Таблица 1 – Геометрические характеристики сечений

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Корневое сечение | Среднее сечение | Периферийное сечение |
| F, мм2 | 708 | 499 | 328 |
| Iu, мм4 | 44385 | 17514 | 44390 |
| Iv, мм4 | 87688 | 57656 | 87690 |
| Ix, мм4 | 893772 | 48867 | 21860 |
| Iy, мм4 | 48301 | 26302 | 26618 |
| Ixy, мм4 | 12419 | 16599 | 18911 |
| φ, ° | 17,5 | 27,8 | 41 |

Материал лопатки: ЭИ929-ВД, плотность: .

Частота вращения ротора:

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

Нормальная сила N в сечениях в зависимости от координаты z:

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

В корневом сечении:

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

Напряжения от растягивающей силы N:

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

В корневом сечении:

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

Распределение напряжений по высоте лопатки представлено на рисунке 2.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 2. Распределение напряжений по высоте лопатки. |

Найдем моменты, возникающие при вращении ротора.

Центры масс сечений лежат на оси z. Тогда

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

Найдем моменты от аэродинамической нагрузки.

Лопатка спрофилирована по закону . Параметры газового потока по высоте лопатки определены в пункте 2.4. Определим интенсивности аэродинамической нагрузки:

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

Тогда моменты от газовых сил:

В корневом сечении:

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

В среднем сечении:

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

Найдем суммарные изгибающие моменты.

В корневом сечении:

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

Относительно главных центральных осей:

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

Положение нейтральной линии:

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

В среднем сечении:

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

Относительно главных центральных осей:

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

Положение нейтральной линии:

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

Построим эпюры нормальных напряжений в наиболее опасном сечении – корневом.

Напряжения от растяжения:

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

Напряжения от действия изгибающих моментов:

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

где u1 и v1 – координаты выходной кромки, а u2 и v2 – координаты спинки.

Значения напряжений в трех точках:

* Входная кромка – 224.7 МПа;
* Выходная кромка – 215.47 МПа;
* Спинка – 194.04 МПа.

Определим коэффициент запаса для опасной точки, которой является выходная кромка. Для выбранного материала (ЭИ929-ВД) предел длительной прочности в течение 10000 часов при температуре 1080 К составляет . Тогда:

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

# **Заключение.**

В результате проектирования была получена осевая двухступенчатая турбина высокого давления турбореактивного двухконтурного двигателя, состоящая из следующих основных узлов: ротор, статор, опор с подшипниками качения.

Ротор турбины состоит из рабочих колес, переднего вала и заднего вала с упругой втулкой. Центрирование переднего вала турбины с рабочим колесом первой ступени, рабочих колес между собой и рабочего колеса второй ступени с задним валом ротора турбины осуществляется по цилиндрическим пояскам. Для стягивания ротора применяются стяжные шпильки. Для передачи крутящего момента и для фиксации от угловых смещений в плоскостях стыка колес между собой и в плоскостях стыка с валами используются втулки.

Крепление рабочих лопаток в дисках выполнено с помощью замка «елочного типа». В осевом направлении лопатки фиксируются с помощью пластины отгибаемой на торцы диска.

Ротор турбины вращается в двух подшипниках качения – передний подшипник шариковый расположен перед компрессором, задний подшипник роликовый расположен за турбиной высокого давления.

Корпус турбины представляет собой соединенные с помощью болтов по фланцам секции цилиндрической формы. Фланцы расположены перпендикулярно к оси турбины.

# **Список использованной литературы.**

1. Михальцев В.Е., Моляков В.Д. Теория и проектирование газовой турбины: учеб. пособие по курсу «Лопаточные машины газотурбинных и комбинированных установок. Газовые турбины». – Ч.1. Под ред. М.И. Осипова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006 г. – 104 с.
2. Михальцев В.Е., Моляков В.Д. Теория и проектирование газовой турбины: учеб. пособие по курсу «Лопаточные машины газотурбинных и комбинированных установок. Газовые турбины». – Ч.2. Под ред. М.И. Осипова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008 г. – 116 с.
3. Михальцев В.Е. Расчет параметров цикла при проектировании газотурбинных двигателей и комбинированных установок: учеб. пособие/ В.Е. Михальцев, В.Д Моляков: под ред. И.Г. Суровцева. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014 г. – 58 с.
4. Манушин Э.А., Суровцев И.Г. Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок./ Под ред. Н.Н. Малинина. - М.: Машиностроение, 1990 г. – 400 с.
5. Скубачевский Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей. М.: Машиностроение, 1969 г. – 547 с.
6. Хронин Д.В. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей/ С. А. Вьюнов, Ю. И. Гусев, А.В. Карпов и др. Под общ. ред. Д.В. Хронина. М : Машиностроение, 1989 г. – 368 с.
7. Иноземцев А. А. Газотурбинные двигатели/ А.А. Иноземцев, В.Л. Саландрацкий. Пермь: ОАО Авиадвигатель, 2006 г. – 1195 с.

# **Приложение А**

# (обязательное)

# **Результаты расчета цикла ТВД при различных значениях степени повышения давления в компрессоре.**

**Таблица А.1 -** Результаты расчета цикла ТВД при различных значениях степени повышения давления в компрессоре.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№ п/п** | **Наимено-**  **вание** | **Размер-ность** | **Значение** | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 |  | - | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 33 | 36 | 39 | 42 | 45 | 48 | 51 |
| 2 |  | кг/с | 753 | 737 | 730 | 728 | 729 | 730,9 | 734 | 737 | 742 | 747 | 752,83 | 758 | 764 | 770 | 777 |
| 3 |  | кг/ч | 75 | 73,36 | 72,5 | 72,2 | 72,19 | 72,3 | 72,5 | 72,8 | 73,2 | 73,68 | 74,16 | 74,6 | 75,2 | 75,8 | 76,4 |
| 4 |  | кг/ч\*кВт | 0.663 | 0.626 | 0.6 | 0.581 | 0.565 | 0.553 | 0.542 | 0.532 | 0.524 | 0.517 | 0.511 | 0.505 | 0.5 | 0.495 | 0.49 |
| 5 |  | - | 2371 | 2407 | 2423 | 2828 | 2426 | 2421 | 2414 | 2405 | 2394 | 2383 | 2370 | 2358 | 2344 | 2331 | 2317 |
| 6 |  | - | 1,528 | 1,664 | 1,737 | 1,804 | 1,867 | 1,926 | 1,982 | 2,037 | 2,089 | 2,14 | 2,19 | 2,238 | 2,286 | 2,333 | 2,379 |
| **Параметры компрессора** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 |  | - | 0.87 | 0.865 | 0.861 | 0.858 | 0.856 | 0.853 | 0.852 | 0.85 | 0.848 | 0.847 | 0.845 | 0.844 | 0.843 | 0.842 | 0.841 |
| 8 |  | K | 581 | 634 | 679 | 716 | 750 | 780 | 807 | 832 | 854 | 876 | 896 | 915 | 933 | 950 | 966 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 10 |  | Дж/кг | 194690 | 250920 | 297920 | 338630 | 374720 | 407270 | 436980 | 464380 | 488950 | 513670 | 53608 | 557250 | 577330 | 596450 | 614700 |
| **Параметры турбины компрессора** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 |  | Па | 884567 | 1179480 | 147428 | 1769130 | 2063990 | 2358850 | 2653700 | 2948560 | 3243410 | 3538270 | 3833120 | 4127980 | 4422740 | 4717690 | 501255 |
| 12 |  | кг/с | 83,76 | 81,9 | 81,21 | 72,24 | 81 | 81,2 | 81,56 | 81,9 | 82,49 | 83,05 | 83,6 | 84,28 | 84,95 | 85,6 | 86,38 |
| 13 |  | кг/с | 670 | 655 | 649 | 647 | 648 | 649 | 652 | 655 | 659 | 664 | 669 | 674 | 679 | 685 | 691 |
| 14 |  | Дж/кг | 239700 | 276600 | 328880 | 373973 | 414116 | 450346 | 483455 | 514011 | 542434 | 569042 | 594084 | 617759 | 640233 | 661638 | 682086 |
| 15 |  | - | 1,605 | 1,858 | 2.107 | 2,356 | 2,67 | 2,862 | 3,112 | 3.388 | 3,66 | 3,993 | 4,226 | 4,52 | 4,823 | 5,135 | 5,457 |
| 16 |  | - | 0.895 | 0.896 | 0,898 | 0.899 | 0.9 | 0.901 | 0.902 | 0.903 | 0.904 | 0.904 | 0.905 | 0.906 | 0.906 | 0.907 | 0.908 |
| 17 |  | Па | 551017 | 634814 | 699758 | 750950 | 791065 | 824117 | 849946 | 870332 | 886196 | 898266 | 907125 | 913228 | 916987 | 918695 | 918638 |

Продолжение таблицы А.1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№ п/п** | **Наимено-**  **вание** | **Размер-ность** | **Значение** | | | | | | | | | | | | | | |
| **Параметры турбины низкого давления** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 |  | - | 2.568 | 2.652 | 2.73 | 2.803 | 2.874 | 2.943 | 3.01 | 3.07 | 3.14 | 3.2 | 3.27 | 3.34 | 3.4 | 3.47 | 3.54 |
| 19 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 20 |  | K | 1690 | 1642 | 1602 | 1567 | 1535 | 1507 | 1480 | 1456 | 1433 | 1412 | 1391 | 1372 | 1354 | 1336 | 1319 |
| 21 |  | - | 0.891 | 0.891 | 0.891 | 0.892 | 0.892 | 0.892 | 0.893 | 0.893 | 0.893 | 0.894 | 0.894 | 0.894 | 0.895 | 0.895 | 0.895 |
| 22 |  | Дж/кг | 369097 | 369524 | 369856 | 370131 | 370366 | 370573 | 370759 | 370929 | 371087 | 371233 | 371369 | 371497 | 371618 | 371731 | 371840 |
| 23 |  | K | 1410 | 1360 | 1317 | 1280 | 1246 | 1216 | 1188 | 1162 | 1138 | 1115 | 1093 | 1073 | 1053 | 1035 | 1017 |

# **Приложение Б**

# (обязательное)

# **Результаты поступенчатого расчета турбины компрессора.**

# **Таблица Б.1 -** Результаты поступенчатого расчета турбины компрессора.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **№ п/п** | **Наименование** | **Размерность** | **1-ая ступень** | **2-ая ступень** |
| 1 |  | Дж/кг | 374263 | 327303 |
| 2 |  | - | 0.21 | 0.22 |
| 3 |  | м/с | 755 | 703 |
| 4 |  | К | 1624 | 1327 |
| 5 |  | Па | 2169087 | 1038126 |
| 6 |  | м/с | 208 | 205 |
| 7 |  | ° | 16.0 | 17 |
| 8 |  | м/с | 726 | 672 |
| 9 |  | м/с | 386 | 339 |
| 10 |  | ° | 32.6 | 37.21 |
| 11 |  | Дж/кг | 79118 | 72372 |
| 12 |  | м/с | 532 | 498 |
| 13 |  | К | 1570 | 1271 |
| 14 |  | Па | 1825095 | 855070 |
| 15 |  | м/с | 216 | 223 |
| 16 |  | ° | 24 | 26,59 |
| 17 |  | м/с | 84.94 | 44.52 |
| 18 |  | ° | 70 | 80.6 |
| 19 |  | м/с | 232 | 227 |
| 20 |  | Дж/кг | 317090 | 282620 |
| 21 |  | - | 0.87 | 0.88 |
| 22 |  | - | 0.91 | 0.94 |
| 23 |  | - | 0.84 | 0.86 |
| 24 |  | Дж/кг | 312867 | 282080 |
| 25 |  | К | 1599 | 1298 |
| 26 |  | Па | 1936499 | 917096 |
| 27 |  | Дж/кг | 347645 | 301690 |
| 28 |  | - | 0.90 | 0.94 |

Продолжение таблицы Б.1.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Параметры турбины** | | | |
| **№ п/п** | **Наименование** | **Размерность** | **Значение** |
| 1 |  | Дж/кг | 620401 |
| 2 |  | Дж/кг | 683546 |
| 3 |  | - | 0.908 |
| 4 |  | - | 0.945 |
| 5 |  | Дж/кг | 657180 |
| 6 |  | - | 0.944 |
| 7 |  | кВт | 4520 |

# **Приложение В**

# (обязательное)

# **Результаты расчета параметров потока по высоте лопатки при различных законах профилирования.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№ п/п** | **Наимено-**  **вание** | **Размер-ность** | Корневое сечение | | | | Среднее сечение | | | | Периферийное сечение | | |
|  | |  | |  | | Г=const | |  | |
| **№ ступени** | | | 1 | 2 |  |  | 1 | 2 |  |  | 1 | 2 |
| 1 |  | м/с | 801 | 787,6 |  |  | 755,9 | 703 |  |  | 715 | 635 |
| 2 |  | м/с | 221,1 | 230,2 |  |  | 208,4 | 205,5 |  |  | 197,2 | 185,8 |
| 3 |  | м/с | 770,8 | 753,2 |  |  | 726 | 672 |  |  | 687,4 | 607,8 |
| 4 |  | м/с | 376 | 354 |  |  | 401 | 401 |  |  | 426 | 448 |
| 5 |  | ° | 16.0 | 17 |  |  | 16 | 17 |  |  | 16 | 17 |
| 6 |  | м/с | 451,7 | 460,2 |  |  | 386 | 339 |  |  | 327 | 244,7 |
| 7 |  | ° | 29.3 | 30.3 |  |  | 32,6 | 37,2 |  |  | 37,08 | 49,4 |
| 8 |  | м/с | 221,9 | 214,7 |  |  | 232 | 227,7 |  |  | 216,1 | 210,5 |
| 9 |  | м/с | 200,5 | 206,5 |  |  | 216,6 | 223,3 |  |  | 202,2 | 207,7 |
| 10 |  | м/с | 94,9 | 58,9 |  |  | 84,9 | 44,5 |  |  | 76,4 | 33,9 |
| 11 |  | м/с | 374 | 351 |  |  | 401 | 401 |  |  | 429 | 451 |
| 12 |  | ° | 64,6 | 74,6 |  |  | 70,6 | 80.6 |  |  | 71,3 | 81,7 |
| 13 |  | м/с | 510,2 | 459,4 |  |  | 532,6 | 498 |  |  | 544,4 | 528,3 |
| 14 |  | ° | 23,1 | 26,7 |  |  | 24 | 26,5 |  |  | 21,8 | 23,16 |
| 15 |  | - | 0.1 | 0.05 |  |  | 0,21 | 0,22 |  |  | 0.3 | 0.37 |
| 16 |  | - | 1,03 | 1.11 |  |  | 0.97 | 0.99 |  |  | 0.92 | 0.9 |
| 17 |  | - | 0.67 | 0.66 |  |  | 0.7 | 0.72 |  |  | 0.71 | 0.76 |

# **Приложение Г**

# (справочное)

# **Результаты поступенчатого расчета турбины компрессора при выборе различных вариантов исходных параметров.**

# **Таблица Г.1 -** Результаты поступенчатого расчета турбины компрессора при выборе различных вариантов исходных параметров.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | **Вариант 1** | | **Вариант 2** | | **Вариант 3** | |
| **№ п/п** | **Наименование** | **Размерность** | **1-ая ступень** | **2-ая ступень** | **1-ая ступень** | **2-ая ступень** | **1-ая ступень** | **2-ая ступень** |
| 1 |  | Дж/кг | 228216 | 237575 | 231474 | 238778 | 228216 | 234147 |
| 2 |  | - | 0.30 | 0.35 | 0.25 | 0.30 | 0.25 | 0.30 |
| 3 |  | Дж/кг | 159751 | 154424 | 173605 | 167145 | 171162 | 163903 |
| 4 |  | м/с | 551.1 | 546.3 | 574.5 | 568.3 | 570.5 | 562.8 |
| 5 |  | К | 1175.9 | 1000.3 | 1165.1 | 985.5 | 1167.0 | 989.9 |
| 6 |  | Па | 860715 | 444066 | 825907 | 417847 | 831970 | 425010 |
| 7 |  | м/с | 133.5 | 151.3 | 139.2 | 177.5 | 138.2 | 161.0 |
| 8 |  | ° | 14.0 | 16.1 | 14.0 | 18.2 | 14.0 | 16.6 |
| 9 |  | м/с | 534.7 | 524.9 | 557.4 | 539.9 | 553.5 | 539.3 |
| 10 |  | м/с | 244.5 | 246.8 | 241.0 | 252.3 | 224.8 | 229.2 |
| 11 |  | ° | 33.1 | 37.8 | 35.3 | 44.7 | 37.9 | 44.6 |
| 12 |  | Дж/кг | 68842 | 87565 | 58219 | 76603 | 57394 | 74990 |
| 13 |  | м/с | 428.8 | 474.7 | 403.2 | 455.9 | 392.4 | 439.7 |
| 14 |  | К | 1125.2 | 933.2 | 1122.4 | 926.6 | 1124.8 | 932.4 |
| 15 |  | Па | 699077 | 326992 | 692005 | 318901 | 699077 | 326601 |
| 16 |  | м/с | 133.3 | 160.0 | 139.4 | 193.8 | 129.4 | 160.1 |
| 17 |  | ° | 18.1 | 19.7 | 20.2 | 25.2 | 19.3 | 21.4 |
| 18 |  | м/с | 77.6 | 117.0 | 17.7 | 52.1 | -5.8 | 33.3 |
| 19 |  | ° | 59.8 | 53.8 | 82.8 | 75.0 | 92.5 | 78.2 |

Продолжение таблицы Г.1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | **Вариант 1** | | **Вариант 2** | | **Вариант 3** | |
| **№ п/п** | **Наименование** | **Размерность** | **1-ая ступень** | **2-ая ступень** | **1-ая ступень** | **2-ая ступень** | **1-ая ступень** | **2-ая ступень** |
| 20 |  | м/с | 154.3 | 198.2 | 140.5 | 200.7 | 129.5 | 163.5 |
| 21 |  | Дж/кг | 202017 | 211772 | 207382 | 213468 | 206029 | 215395 |
| 22 |  | - | 0.84 | 0.88 | 0.83 | 0.87 | 0.84 | 0.88 |
| 23 |  | - | 0.87 | 0.91 | 0.86 | 0.91 | 0.87 | 0.91 |
| 24 |  | - | 0.82 | 0.87 | 0.81 | 0.86 | 0.82 | 0.87 |
| 25 |  | Дж/кг | 198493 | 204630 | 203820 | 205591 | 201842 | 207558 |
| 26 |  | К | 1125.8 | 951.3 | 1121.6 | 945.4 | 1123.2 | 945.9 |
| 27 |  | Па | 725004 | 350763 | 713291 | 342815 | 717281 | 342619 |
| 28 |  | Дж/кг | 215726 | 215951 | 221088 | 217044 | 219304 | 219037 |
| 29 |  | - | 0.86 | 0.90 | 0.85 | 0.89 | 0.86 | 0.90 |