**Содержание**

С.

[**4 Расчёт на прочность** 2](#_Toc197805753)

[**Заключение.** 6](#_Toc197805754)

[**Список использованной литературы.** 7](#_Toc197805755)

[**Приложение А** 8](#_Toc197805756)

[(обязательное) 8](#_Toc197805757)

[**Результаты расчета цикла ТВД при различных значениях степени повышения давления в компрессоре.** 8](#_Toc197805758)

[**Приложение Б** 10](#_Toc197805759)

[(обязательное) 10](#_Toc197805760)

[**Результаты поступенчатого расчета турбины компрессора.** 10](#_Toc197805761)

[**Таблица Б.1 -** Результаты поступенчатого расчета турбины компрессора. 10](#_Toc197805762)

[**Приложение В** 12](#_Toc197805763)

[(обязательное) 12](#_Toc197805764)

[**Результаты расчета параметров потока по высоте лопатки при различных законах профилирования.** 12](#_Toc197805765)

[**Приложение Г** 13](#_Toc197805766)

[(справочное) 13](#_Toc197805767)

[**Результаты поступенчатого расчета турбины компрессора при выборе различных вариантов исходных параметров.** 13](#_Toc197805768)

[**Таблица Г.1 -** Результаты поступенчатого расчета турбины компрессора при выборе различных вариантов исходных параметров. 13](#_Toc197805769)

# **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 |