

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н.Э.БАУМАНА

Факультет "Энергомашиностроение"
Кафедра "ЭЗ"

Жигалкин Александр Сергеевич

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Проектирование свободной турбины ТВлД

Руководитель курсового проекта

« ____ » _____ 2016 г. В. Н. Шадрин

Москва, 2016 г.

1 Задание

Спроектировать двухступенчатую свободную турбину турбовального двигателя с температурой после камеры сгорания $T_{\Gamma}^* = 1463 \text{ K}$ и мощностью на валу свободной турбины $N_e = 2.07 \text{ МВт}$.

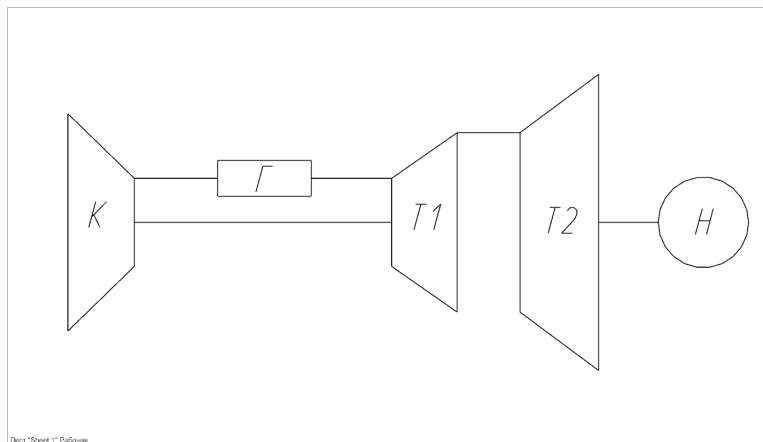


Рис. 1: Схема ГТД

Содержание

1	Задание	1
2	Расчет параметров цикла ГТД	3
2.1	Исходные данные	3
2.2	Вариантные расчеты	3
2.3	Расчет цикла при $\pi_k = 13.41$	5
3	Поступенчатый расчет турбины	10
3.1	Расчет первой ступени	10
3.2	Расчет второй ступени	14
3.3	Вычисление интегральных параметров турбины	18
4	Профилирование первой ступени турбины компрессора	19
5	Расчет на прочность диска первой ступени	22
5.1	Исходные данные для расчета	22
5.2	Алгоритм расчета	22
5.3	Результаты расчета	23

2 Расчет параметров цикла ГТД

2.1 Исходные данные

Величина	Обозначение	Размерность	Значение
Политропический КПД компрессора	$\eta_{кр}^*$	-	0.9
Полнота сгорания топлива	$\eta_{г}$	-	0.98
Политропический КПД турбины компрессора	$\eta_{ткр}^*$	-	0.91
Политропический КПД свободной турбины	$\eta_{тр}^*$	-	0.91
Относительная скорость на выходе из ГТД	$\lambda_{вых}$	-	0.05
Мощность на валу свободной турбины	N_e	кВт	2069.0
Температура перед турбиной компрессора	$T_{г}^*$	К	1463.5
Коэффициент сохранения полного давления во входном устройстве компрессора	$\sigma_{вх}$	-	0.995
Коэффициент сохранения полного давления в камере сгорания	$\sigma_{г}$	-	0.961
Коэффициент сохранения полного давления в выходном патрубке	$\sigma_{вых}$	-	0.995
Механический КПД турбины компрессора	$\eta_{м}$	-	0.99
КПД редуктора	$\eta_{р}$	-	0.985
Относительный расход утечек	$g_{ут}$	-	0.01
Относительный расход на охлаждение	$g_{охл}$	-	0.18
Относительный расход возвращаемого воздуха	$g_{возвр}$	-	0.02

2.2 Вариантные расчеты

Для определения оптимальной степени повышения давления в компрессоре был произведен расчет цикла ГТД для различных значений π_k^* в интервале 6 до 27. В результате были построены графики зависимостей КПД, удельной расхода топлива и расхода через компрессор от степени повышения давления в компрессоре.

Ниже представлены графики зависимостей КПД, расхода топлива и расхода воздуха ГТД от π_k^* . Также представлен их сводный график, на котором для наглядности значения КПД, расхода топлива и расхода воздуха отнесены к максимальным на представленном промежутке значений степени повышения давления.

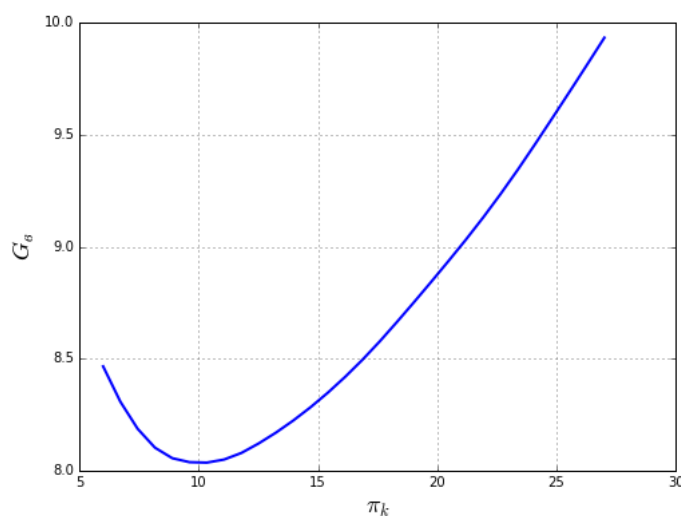


Рис. 2: Зависимость расхода воздуха от степени повышения давления

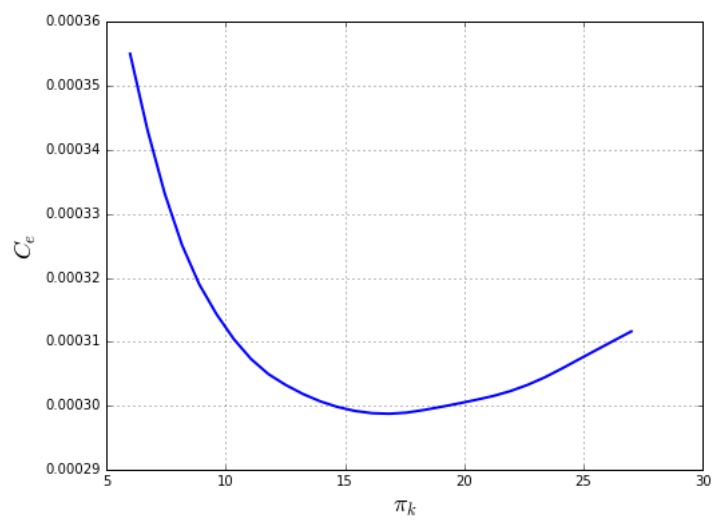


Рис. 3: Зависимость удельного расхода топлива от степени повышения давления

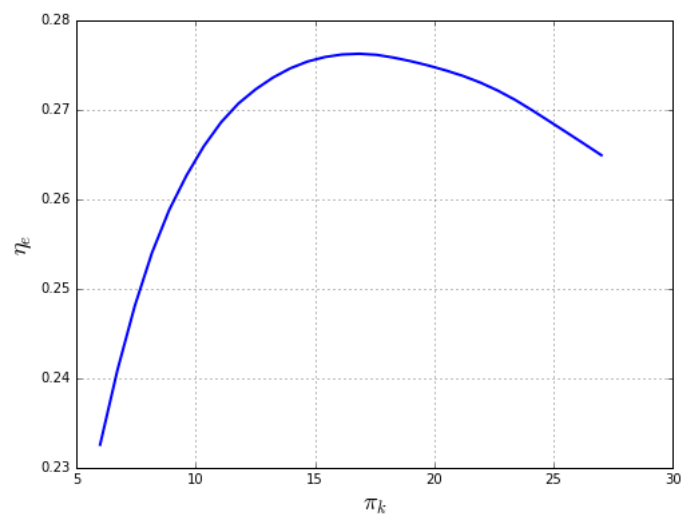


Рис. 4: Зависимость КПД двигателя от степени повышения давления

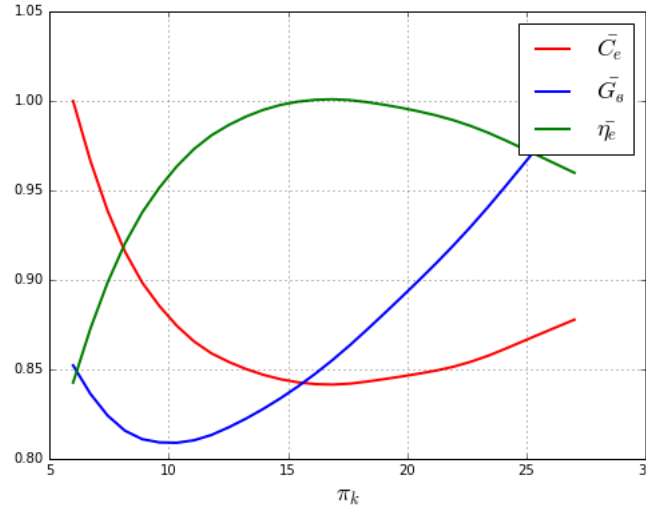


Рис. 5: Сводный график зависимостей КПД, расхода воздуха и расхода топлива от степени повышения давления в компрессоре

В качестве оптимального принимаем $\pi_k = 13.41$.

Ниже представлен расчет цикла ГТД при $\pi_k = 13.41$

2.3 Расчет цикла при $\pi_k = 13.41$

Расчет некоторых узлов ГТД (а именно обоих турбин и компрессора) носит итерационный характер, так как удельная теплоемкость и коэффициент адиабаты зависят от температуры на выходе из узла. Поэтому ниже представлены расчеты для последних итераций.

1. Определим давление за входным устройством:

$$p_{\text{вх}}^* = \sigma_{\text{вх}} p_a = 0.995 \cdot 0.1013 = 0.101 \text{ МПа}$$

2. Определим давление за компрессором:

$$p_k^* = \pi_k p_{\text{вх}}^* = 13.41 \cdot 0.101 = 1.352 \text{ МПа}$$

3. Определим адиабатический КПД компрессора, принимая показатель адиабаты воздуха $k_B = 1.403$:

$$\eta_k^* = \frac{\frac{k_B - 1}{\pi_k} - 1}{\frac{k_B - 1}{k_B \eta_{kp}^*} - 1} = \frac{13.41^{\frac{1.403 - 1}{1.403}} - 1}{13.41^{\frac{1.403 - 1}{1.403 \cdot 0.9 - 1}} - 1} = 0.8589$$

4. Определим температуру газа за компрессором:

$$T_k^* = T_a \left[1 + \frac{\pi_k^{\frac{k_B - 1}{k_B}} - 1}{\eta_k^*} \right] = 288 \left[1 + \frac{13.41^{\frac{1.403 - 1}{1.403}} - 1}{0.8589} \right] = 659.096 \text{ K}$$

5. Определим уточненное значение показателя адиабаты:

- 5.1. Средняя теплоемкость воздуха при температуре T_a :

$$\begin{aligned} c_{p\text{вср}}(T_a) &= (1.2 \cdot 10^{-5} (T_a - 70) + 0.236) \cdot 4.187 \cdot 10^3 = \\ &= (1.2 \cdot 10^{-5} (288 - 70) + 0.236) \cdot 4.187 \cdot 10^3 = 999.085 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

- 5.2. Средняя теплоемкость воздуха при температуре T_k^* :

$$\begin{aligned} c_{p\text{вср}}(T_k^*) &= (1.2 \cdot 10^{-5} (T_a - 70) + 0.236) \cdot 4.187 \cdot 10^3 = \\ &= (1.2 \cdot 10^{-5} (659.096 - 70) + 0.236) \cdot 4.187 \cdot 10^3 = 1017.731 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

5.3. Средняя теплоемкость воздуха в интервале температур от T_a до T_K^* :

$$c_{pв} = \frac{c_{pвср}(T_K^*)(T_K^* - T_0) - c_{pвср}(T_a)(T_a - T_0)}{T_K^* - T_a} =$$

$$= \frac{1017.731 \cdot (659.096 - 273) - 999.085 \cdot (288 - 273)}{659.096 - 288} = 1018.484 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

5.4. Новое значение показателя адиабаты:

$$k'_в = \frac{c'_{pв}}{c'_{pв} - R_в} = \frac{1018.484}{1018.484 - 287.4} = 1.393$$

6. Определим погрешность определения показателя адиабаты:

$$\delta = \frac{|k'_в - k_в|}{k_в} \cdot 100\% = \frac{|1.393 - 1.403|}{1.403} \cdot 100\% = 0.68\% < 5\%$$

Точность определения показателя адиабаты воздуха находится в пределах допуска.

7. Используя найденный показатель адиабаты воздуха, определим теплоемкость воздуха в процессе сжатия воздуха в компрессоре:

$$c_{pв} = \frac{k_в}{k_в - 1} R_в = \frac{1.403}{1.403 - 1} \cdot 287.4 = 1018.484 \text{ Дж}/\text{кг}$$

8. Определим работу компрессора:

$$L_K = c_{pв} (T_K^* - T_a) = 1018.484 \cdot (659.096 - 288) = 0.378 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$$

9. Температура газа за камерой сгорания:

$$T_\Gamma^* = 1463.5 \text{ К}$$

10. Определим относительный расход топлива. Теплоемкость продуктов сгорания керосина рассчитывается через коэффициент избытка воздуха температуру. При расчета приняты следующие значения:

1) температура определения теплофизических параметров веществ:

$$T_0 = 290 \text{ К};$$

2) средняя теплоемкость воздуха перед камерой сгорания:

$$c_{pв}(T_K^*) = 1017.731 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

3) средняя теплоемкость чистых продуктов сгорания керосина после камеры сгорания:

$$c_{pг}(T_\Gamma^*, 1) = \left[\frac{1.25 + 2.2}{10^5} (T_\Gamma^* + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 =$$

$$= \left[\frac{1.25 + 2.2}{10^5} (1463.5 + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 = 1189.174 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

4) средняя теплоемкость чистых продуктов сгорания керосина при температуре T_0 :

$$c_{pг}(T_0, 1) = \left[\frac{2.25 + 1.2}{10^5} (T_0 - 70) + 0.236 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 =$$

$$\left[\frac{2.25 + 1.2}{10^5} (290 - 70) + 0.236 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 = 1019.622 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

5) низшая теплота сгорания топлива:

$$Q_H^p = 43600.0 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

6) полнота сгорания:

$$\eta_\Gamma = 0.98;$$

7) масса воздуха, необходимая для сжигания 1 кг топлива:

$$l_0 = 14.61 \text{ кг};$$

10.1. Определим относительный расход топлива:

$$g_m = \frac{G_m}{G_B} = \frac{c_{p\Gamma}(T_{\Gamma}^*) T_{\Gamma}^* - c_{pB}(T_K^*) T_K^*}{Q_H^p \eta_{\Gamma} - [c_{p\Gamma}(T_{\Gamma}^*) T_{\Gamma}^* - c_{p\Gamma}(T_0) T_0]} =$$

$$= \frac{1189.174 \cdot 1463.5 - 1017.731 \cdot 659.096}{43600.0 \cdot 10^3 \cdot 0.98 - [1189.174 \cdot 1463.5 - 1019.622 \cdot 290]} = 0.0259$$

10.2. Определим коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{1}{g_m l_0} = \frac{1}{0.0259 \cdot 14.61} = 2.642$$

11. Определим относительный расход газа:

$$g_{\Gamma} = (1 + g_m)(1 - g_{yt} - g_{охл}) + g_{возвр} = (1 + 0.0259)(1 - 0.01 - 0.18) + 0.02 = 0.851$$

Расчет турбины компрессора состоит из двух частей. Первая часть - это определения температуры на выходе из турбины. Этот расчет является итерационным и ведется до сходимости по k_{Γ} . Вторая часть - расчет давления торможения на выходе из турбины. Этот расчет также является итерационным и ведется до сходимости по $\pi_{\Gamma K}^*$. Ниже приведены последние итерации обоих расчетов.

12. Определим удельную работу турбины компрессора:

$$L_{\Gamma K} = \frac{L_K}{g_{\Gamma} \eta_m} = \frac{0.378 \cdot 10^6}{0.851 \cdot 0.99} = 0.449 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

13. Определим давление газа перед турбиной компрессора:

$$p_{\Gamma}^* = p_K^* \sigma_{\Gamma} = 1.352 \cdot 0.961 = 1.299 \text{ МПа}$$

14. Определим среднюю теплоемкость газа в процессе расширения газа в турбине, принимая показатель адиабаты газа $k_{\Gamma} = 1.309$:

$$c_{p\Gamma} = \frac{k_{\Gamma}}{k_{\Gamma} - 1} R_{\Gamma} = \frac{1.309}{1.309 - 1} \cdot 287.4 = 1218.599 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$$

15. Определим температуру за турбиной компрессора:

$$T_{\Gamma K}^* = T_{\Gamma}^* - \frac{L_{\Gamma K}}{c_{p\Gamma}} = 1463.5 - \frac{0.449 \cdot 10^6}{1218.599} = 1095.352$$

16. Определим уточненное значение показателя адиабаты газа:

16.1. Определим значение средней теплоемкости газа при температуре $T_{\Gamma K}^*$:

$$c_{p\Gamma \text{ ср}}(T_{\Gamma K}^*) = \left[\frac{1.25 + 2.2\alpha}{\alpha \cdot 10^5} (T_{\Gamma K}^* + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 =$$

$$= \left[\frac{1.25 + 2.2 \cdot 2.642}{2.642 \cdot 10^5} (1095.352 + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 = 1085.731 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$$

16.2. Определим значение средней теплоемкости при температуре T_{Γ}^* :

$$c_{p\Gamma \text{ ср}}(T_{\Gamma}^*) = \left[\frac{1.25 + 2.2\alpha}{\alpha \cdot 10^5} (T_{\Gamma K}^* + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 =$$

$$\left[\frac{1.25 + 2.2 \cdot 2.642}{2.642 \cdot 10^5} (1095.352 + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 = 1006.859 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$$

16.3. Новое значение средней теплоемкости в интервале температур от T_{TK}^* до T_{Γ}^* :

$$c'_{p\Gamma} = \frac{c_{p\Gamma \text{ ср}}(T_{\Gamma}^*)(T_{\Gamma}^* - T_0) - c_{p\Gamma \text{ ср}}(T_{\text{TK}}^*)(T_{\text{TK}}^* - T_0)}{T_{\Gamma}^* - T_{\text{TK}}^*} =$$

$$= \frac{1006.859 \cdot (1463.5 - 273) - 1085.731 \cdot (1095.352 - 273)}{1463.5 - 1095.352} = 1218.978 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

16.4. Новое значение показателя адиабаты:

$$k'_B = \frac{c'_{p\Gamma}}{c'_{p\Gamma} - R_{\Gamma}} = \frac{1218.978}{1218.978 - 287.4} = 1.309$$

17. Определим погрешность определения показателя адиабаты:

$$\delta = \frac{|k'_{\Gamma} - k_{\Gamma}|}{k_{\Gamma}} \cdot 100\% = \frac{|1.309 - 1.309|}{1.309} \cdot 100\% = 0.01\% < 5\%$$

Погрешность определения показателя адиабаты в пределах допуска.

18. Определим значение адиабатического КПД турбины компрессора, приняв степень понижения давления $\pi_{\text{TK}} = 3.872$:

$$\eta_{\text{TK}}^* = \frac{1 - \pi_{\text{TK}}^{\frac{(1-k_{\Gamma})\eta_{\text{TKP}}^*}{k_{\Gamma}}}}{1 - \pi_{\text{TK}}^{\frac{1-k_{\Gamma}}{k_{\Gamma}}}} = \frac{1 - 3.872^{\frac{(1-1.309) \cdot 0.91}{1.309}}}{1 - 3.872^{\frac{1-1.309}{1.309}}} = 0.922$$

19. Определим давление воздуха за турбиной компрессора:

$$p_{\text{TK}}^* = p_{\Gamma}^* \left[1 - \frac{L_{\text{TK}}}{c_{p\Gamma} T_{\Gamma}^* \eta_{\text{TK}}^*} \right]^{\frac{k_{\Gamma}}{k_{\Gamma}-1}} = 1.299 \left[1 - \frac{0.449 \cdot 10^6}{1218.599 \cdot 1463.5 \cdot 0.922} \right]^{\frac{1.309}{1.309-1}} = 0.337 \text{ МПа}$$

20. Определим новую степень понижения давления:

$$\pi_{\text{TK}}^{*'} = \frac{p_{\Gamma}^*}{p_{\text{TK}}^*} = \frac{1.299}{0.337} = 3.857$$

21. Определим погрешность определения степени понижения давления:

$$\delta = \frac{|\pi_{\text{TK}}^{*'} - \pi_{\text{TK}}^*|}{\pi_{\text{TK}}^*} \cdot 100\% = \frac{|3.857 - 3.872|}{3.872} \cdot 100\% = 0.39\% < 5\%$$

Погрешность определения степени понижения давления в пределах допуска.

22. Зададим значение приведенной скорости на выходе из выходного устройства:

$$\lambda_{\text{ВЫХ}} = 0.05$$

23. Определим давление торможения на выходе из выходного устройства, задавая показатель адиабаты газа $k_{\Gamma} = 1.321$:

$$p_{\text{ВЫХ}}^* = p_a \pi(\lambda_{\text{ВЫХ}}, k_{\Gamma}) = 0.1013 \cdot \pi(0.05, 1.321) = 0.101 \text{ МПа}$$

24. Определим давление торможения за силовой турбиной:

$$p_{\text{T}}^* = \frac{p_{\text{ВЫХ}}^*}{\sigma_{\text{ВЫХ}}} = \frac{0.101}{0.995} = 0.102 \text{ МПа}$$

25. Определим степень понижения давления в силовой турбине:

$$\pi_{\text{T}} = \frac{p_{\text{TK}}^*}{p_{\text{T}}^*} = \frac{0.337}{0.102} = 3.324$$

26. Определим адиабатический КПД силовой турбины:

$$\eta_{\text{T}}^* = \frac{1 - \pi_{\text{T}}^{\frac{(1-k_{\Gamma})\eta_{\text{TKP}}^*}{k_{\Gamma}}}}{1 - \pi_{\text{T}}^{\frac{1-k_{\Gamma}}{k_{\Gamma}}}} = \frac{1 - 3.324^{\frac{(1-1.321) \cdot 0.91}{1.321}}}{1 - 3.324^{\frac{1-1.321}{1.321}}} = 0.9215$$

27. Определим температуру торможения на выходе из силовой турбины:

$$T_T^* = T_{TK}^* \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{p_{TK}^*}{p_T^*} \right)^{\frac{k_T}{k_T-1}} \right] \eta_T^* \right\} = 1095.352 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{0.337}{0.102} \right)^{\frac{1.321}{1.321-1}} \right] \cdot 0.9215 \right\} = 840.0 \text{ K}$$

28. Определим уточненное значение показателя адиабаты газа в процессе расширения в силовой турбине:

28.1. Определим значение средней теплоемкости газа при температуре T_{TK}^* :

$$c_{гр\text{cp}}(T_{TK}^*) = \left[\frac{1.25 + 2.2\alpha}{\alpha \cdot 10^5} (T_{TK}^* + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 =$$

$$= \left[\frac{1.25 + 2.2 \cdot 2.642}{2.642 \cdot 10^5} (1095.352 + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 = 1085.731 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$$

28.2. Определим значение средней теплоемкости при температуре T_T^* :

$$c_{гр\text{cp}}(T_T^*) = \left[\frac{1.25 + 2.2\alpha}{\alpha \cdot 10^5} (T_{TK}^* + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 =$$

$$\left[\frac{1.25 + 2.2 \cdot 2.642}{2.642 \cdot 10^5} (1095.352 + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 = 1057.14 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$$

28.3. Значение средней теплоемкости в интервале температур от T_T^* до T_{TK}^* :

$$c_{гр} = \frac{c_{гр\text{cp}}(T_{TK}^*)(T_{TK}^* - T_0) - c_{гр\text{cp}}(T_T^*)(T_T^* - T_0)}{T_{TK}^* - T_T^*} =$$

$$\frac{1085.731 \cdot (1095.352 - 273) - 1057.14 \cdot (840.0 - 273)}{1095.352 - 840.0} = 1149.182 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$$

28.4. Новое значение показателя адиабаты:

$$k'_B = \frac{c_{гр}}{c_{гр} - R_T} = \frac{1218.978}{1218.978 - 287.4} = 1.333$$

29. Определим погрешность определения показателя адиабаты газа в процессе расширения в силовой турбине:

$$\delta = \frac{|k'_T - k_T|}{k_T} \cdot 100\% = \frac{|1.333 - 1.321|}{1.321} \cdot 100\% = 0.01\% < 5\%$$

Погрешность определения показателя адиабаты в пределах допуска.

30. Определим значение теплоемкости газа в свободной турбине:

$$c_{гр} = \frac{k_T}{k_T - 1} R_T = \frac{1.321}{1.321 - 1} \cdot 287.4 = 1149.182 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$$

31. Определим удельную работу силовой турбины:

$$L_T = c_{гр} \cdot (T_{TK}^* - T_T^*) = 1149.182 (1095.352 - 840.0) = 0.294 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

32. Определим удельную мощность ГТД:

$$N_{\text{еуд}} = L_T g_T \eta_m \eta_p = 0.294 \cdot 10^6 \cdot 0.8510 \cdot 0.990985 = 0.2436 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

33. Определим экономичность ГТД:

$$C_e = \frac{3600}{N_{\text{еуд}}} g_T (1 - g_{\text{охл}} - g_{\text{YT}}) = \frac{3600}{0.2436 \cdot 10^6} \cdot 0.0259 \cdot (1 - 0.18 - 0.01) = 0.3101 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(Вт} \cdot \text{ч)}$$

34. Определим КПД ГТД:

$$\eta_e = \frac{3600}{C_e Q_{\text{H}}^P} = \frac{3600}{0.3101 \cdot 10^{-3} \cdot 43600.0 \cdot 10^6} = 0.2662$$

35. Определим расход воздуха:

$$G_B = \frac{N_e}{N_{\text{еуд}}} = \frac{2069.0 \cdot 10^3}{0.2436 \cdot 10^6} = 8.492 \text{ кг/с}$$

3 Поступенчатый расчет турбины

3.1 Расчет первой ступени

Исходные данные для расчета первой ступени:

Величина	Обозначение	Размерность	Значение
Реактивность ступени	ρ	-	0.32
Радиальный зазор	δ_r	-	0.00066
Относительная длина лопатки статора	$\left(\frac{l}{D}\right)_1$	-	0.17
Удлинение лопатки статора	$\left(\frac{l}{b_a}\right)_{CA}$	-	2.037
Удлинение лопатки ротора	$\left(\frac{l}{b_a}\right)_{PK}$	-	4.0
Относительная ширина зазора между лопатками ротора и лопатками статора	$\left(\frac{\delta}{b_a}\right)_{CA}$	-	0.2593
Угол раскрытия на втулке	$\gamma_{вт}$	°	8.0
Угол раскрытия на периферии	$\gamma_{пер}$	°	13.2
Темлоперепад по статическим параметрам	H_T	Дж/кг	0.18

1. Определим теплоперепад на сопловом аппарате:

$$H_c = (1 - \rho) H_T = (1 - 0.32) \cdot 0.18 \cdot 10^6 = 0.122 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

2. Примем коэффициент адиабаты равным: $k_r = 1.3287$

3. Теплоемкость газа при данном значении коэффициента адиабаты:

$$c_{pr} = \frac{k_r R_r}{k_r - 1} = \frac{1.3287 \cdot 287}{1.3287 - 1} = 1162.0 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$$

4. Определим действительную скорость истечения из СА:

$$c_1 = \phi \sqrt{2H_c} = 0.97 \cdot \sqrt{20.122 \cdot 10^6} = 479.929 \text{ м/с}$$

5. Определим температуру на выходе из СА:

$$T_1 = T_0^* - \frac{c_1^2}{2c_{pr}} = 1095.352 - \frac{479.929^2}{2 \cdot 1162.0} = 996.225 \text{ K}$$

6. Определим температуру конца адиабатного расширения:

$$T_1' = T_0^* - \frac{H_c}{c_{pr}} = 1095.352 - \frac{0.122 \cdot 10^6}{1162.0} = 990.0 \text{ K}$$

7. Определим давление на выходе из СА:

$$p_1 = p_0^* \left(\frac{T_1'}{T_0^*} \right)^{\frac{k_r}{k_r - 1}} = 0.337 \cdot \left(\frac{990.0}{1095.352} \right)^{\frac{1.3287}{1.3287 - 1}} = 0.224 \text{ МПа}$$

8. Определим плотность газа на выходе из СА:

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R_r T_1} = \frac{0.224 \cdot 10^6}{287 \cdot 996.225} = 0.782 \text{ кг/м}^3$$

9. Зададим угол на выходе из СА:

$$\alpha_1 = 16.994^\circ$$

10. Определим осевую скорость на выходе из СА:

$$c_{1a} = c_1 \cdot \sin \alpha_1 = 479.929 \cdot \sin 16.994^\circ = 140.272 \text{ м/с}$$

11. Определим площадь на выходе из СА:

$$A_1 = \frac{G}{c_{1a} \rho_1} = \frac{7.0}{140.272 \cdot 0.782} = 0.06591 \text{ м}^2$$

12. Определим средний диаметр турбины на выходе из СА:

$$D_1 = \sqrt{\frac{A_1}{\pi \left(\frac{l}{D}\right)_1}} = \sqrt{\frac{0.06591}{\pi \cdot 0.17}} = 0.3513 \text{ м}$$

13. Определим окружную скорость на среднем диаметре на входе в РК:

$$u_1 = \frac{\pi D_1 n}{60} = \frac{\pi \cdot 0.3513 \cdot 18000.0}{60} = 331.091 \text{ м/с}$$

14. Определим относительную скорость на входе в РК:

$$w_1 = \sqrt{c_1^2 + u_1^2 - 2c_1 u_1 \cos \alpha_1} = \sqrt{479.929^2 + 331.091^2 - 2 \cdot 479.929 \cdot 331.091 \cdot \cos 16.994^\circ} = 189.815 \text{ м/с}$$

15. Определим теплоперепад на РК:

$$H_{\text{л}} = H_{\text{т}} \rho \frac{T_1}{T'_1} = 0.18 \cdot 10^6 \cdot 0.32 \cdot \frac{996.225}{990.0} = 0.058 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

16. Определим осевую ширину рабочего колеса:

$$b_{\text{а РК}} = \left(\frac{l}{b_a}\right)_{\text{РК}} \frac{1}{1 - \frac{\tan \gamma_{\text{н}} + \tan \gamma_{\text{в}}}{\left(\frac{l}{b_a}\right)_{\text{РК}}}} D_1 \left(\frac{l}{D}\right)_1 = 4.0 \frac{1}{1 - \frac{\tan 13.2^\circ + \tan 8.0^\circ}{4.0}} 0.3513 \cdot 0.17 = 0.016$$

17. Определим средний диаметра на выходе из РК:

$$D_2 = D_1 + \frac{\tan \gamma_{\text{в}} - \tan \gamma_{\text{н}}}{2} b_{\text{а РК}} = 0.3513 + \frac{\tan 8.0^\circ - \tan 13.2^\circ}{2} \cdot 0.016 = 0.3528 \text{ м}$$

18. Определим длину лопатки на выходе из РК:

$$l_2 = D_1 \left(\frac{l}{D}\right)_1 + \frac{\tan \gamma_{\text{в}} + \tan \gamma_{\text{н}}}{2} b_{\text{а РК}} = 0.3513 \cdot 0.17 + \frac{\tan 8.0^\circ + \tan 13.2^\circ}{2} \cdot 0.016 = 0.0659 \text{ м}$$

19. Определим относительную длину лопаток на выходе из РК:

$$\left(\frac{l}{D}\right)_2 = \frac{l_2}{D_2} = \frac{0.0659}{0.3528} = 0.187$$

20. Определим площадь на выходе из РК:

$$A_2 = \pi D_2 l_2 = \pi \cdot 0.3528 \cdot 0.0659 = 0.073051 \text{ м}^2$$

21. Определим окружную скорость на среднем диаметре на выходе из РК:

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60} = \frac{\pi \cdot 0.3528 \cdot 18000.0}{60} = 332.551 \text{ м/с}$$

22. Определим относительную скорость истечения газа из РК:

$$w_2 = \psi \sqrt{w_1^2 + 2H_{\text{л}} + (u_2^2 - u_1^2)} = 0.97 \cdot \sqrt{189.815^2 + 2 \cdot 0.058 \cdot 10^6 + (332.551^2 - 331.091^2)} = 379.322 \text{ м/с}$$

23. Определим статическую температуру на выходе из РК:

$$T_2 = T_1 + \frac{(w_1^2 - w_2^2) + (u_2^2 - u_1^2)}{2c_{\text{пр}}} = 996.225 + \frac{(189.815^2 - 379.322^2) + (332.551^2 - 331.091^2)}{2 \cdot 1162.0} = 950.224 \text{ К}$$

24. Определим статическую температуру при адиабатическом процессе в РК:

$$T'_2 = T_1 - \frac{H_{\text{л}}}{c_{\text{пр}}} = 996.225 - \frac{0.058 \cdot 10^6}{1162.0} = 946.335 \text{ К}$$

25. Определим давление на выходе из РК:

$$p_2 = p_1 \left(\frac{T_2'}{T_1} \right)^{\frac{k_r}{k_r-1}} = 0.224 \left(\frac{946.335}{996.225} \right)^{\frac{1.3287}{1.3287-1}} = 0.182 \text{ МПа}$$

26. Определим плотность газа на выходе из РК:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{RT_2} = \frac{0.182 \cdot 10^6}{287 \cdot 950.224} = 0.666$$

27. Определим осевую составляющую абсолютной скорости на выходе из РК:

$$c_{2a} = \frac{G}{A_2 \rho_2} = \frac{7.0}{0.073051 \cdot 0.666} = 148.581$$

28. Определим угол в относительном движении на выходе из РК:

$$\beta_2 = \arcsin \frac{c_{2a}}{w_2} = \arcsin \frac{148.581}{379.322} = 23.06^\circ$$

29. Определим угол выхода из РК в абсолютном движении:

$$\alpha_2 = \arctan \frac{w_2 \cos \beta_2 - u_2}{c_{2a}} = \arctan \frac{379.322 \cdot \cos 23.06^\circ - 332.551}{148.581} = 83.678^\circ$$

30. Определим окружную составляющую скорости на выходе из РК:

$$c_{2u} = w_2 \cos \beta_2 - u_2 = 379.322 \cdot \cos 23.06^\circ - 332.551 = 16.461 \text{ м/с}$$

31. Определим скорость потока на выходе из РК:

$$c_2 = \sqrt{c_{2u}^2 + c_{2a}^2} = \sqrt{16.461^2 + 148.581^2} = 149.49 \text{ м/с}$$

32. Определим работу на окружности колеса:

$$L_u = c_{1u} u_1 + c_{2u} u_2 = 458.973 \cdot 331.091 + 16.461 \cdot 332.551 = 0.157 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

33. Определим КПД на окружности колеса:

$$\eta_u = \frac{L_u}{H_t} = \frac{0.157}{0.18} = 0.8746$$

34. Определим удельные потери на статоре:

$$h_c = \left(\frac{1}{\phi^2} - 1 \right) \frac{c_1^2}{2} = \left(\frac{1}{0.97^2} - 1 \right) \frac{479.929^2}{2} = 7.234 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

35. Определим удельные потери на роторе:

$$h_p = \left(\frac{1}{\psi^2} - 1 \right) \frac{w_2^2}{2} = \left(\frac{1}{0.97^2} - 1 \right) \frac{379.322^2}{2} = 4.519 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

36. Определим удельные потери с выходной скоростью:

$$h_{\text{вых}} = \frac{c_2^2}{2} = \frac{149.49^2}{2} = 11.174 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

37. Определим удельные потери в радиальном зазоре:

$$\begin{aligned} h_z &= 1.37 \cdot (1 + 1.6\rho) \left[1 + \left(\frac{l}{D} \right)_1 \right] \frac{\delta_r}{l_2} L_u = \\ &= 1.37 \cdot (1 + 1.6 \cdot 0.32) [1 + 0.187] \frac{0.00066}{0.0659} \cdot 0.157 = 3.872 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \end{aligned}$$

38. Определим удельные потери на вентиляцию:

$$h_{\text{вент}} = \frac{1.07 D_2^2 \left(\frac{u_2}{100}\right)^3 \rho}{G} = \frac{1.07 \cdot 0.3528^2 \left(\frac{332.551}{100}\right)^3 \cdot 0.32}{7.0} = 0.000215 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

39. Определим температуру торможения за РК:

$$T_2^* = T_2 + \frac{h_3 + h_{\text{вент}} + h_{\text{вых}}}{c_{p\Gamma}} = 950.224 + \frac{3.872 \cdot 10^3 + 0.000215 \cdot 10^3 + 11.174 \cdot 10^3}{1162.0} = 963.174 \text{ K}$$

40. Определим давление торможения за РК:

$$p_2^* = p_2 \left(\frac{T_2^*}{T_2}\right)^{\frac{k_{\Gamma}}{k_{\Gamma}-1}} = 0.182 \cdot \left(\frac{963.174}{950.224}\right)^{\frac{1.3287}{1.3287-1}} = 0.189 \text{ МПа}$$

41. Определим мощностной КПД ступени:

$$\eta_{\text{т мощн}} = \eta_u - \frac{h_3 + h_{\text{вент}}}{H_{\text{т}}} = 0.8746 - \frac{3.872 \cdot 10^3 + 0.000215 \cdot 10^3}{0.18 \cdot 10^6} = 0.8531$$

42. Определим работу ступени:

$$L_{\text{т}} = H_{\text{т}} \eta_{\text{т}} = 0.18 \cdot 10^6 \cdot 0.8531 = 0.154 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

43. Определим теплоперепад по параметрам торможения:

$$H_{\text{т}}^* = c_{p\Gamma} T_0^* \left[1 - \left(\frac{p_2^*}{p_0^*}\right)^{\frac{k_{\Gamma}-1}{k_{\Gamma}}}\right] = 1162.0 \cdot 1095.352 \left[1 - \left(\frac{0.189}{0.337}\right)^{\frac{1.3287-1}{1.3287}}\right] = 0.169 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

44. Определим КПД ступени по параметрам торможения:

$$\eta_{\text{т}}^* = \frac{L_{\text{т}}}{H_{\text{т}}^*} = \frac{0.154 \cdot 10^6}{0.169 \cdot 10^6} = 0.9088$$

45. Определим уточненное значение показателя адиабаты газа в процессе расширения в ступени:

45.1. Определим значение средней теплоемкости газа при температуре T_0^* :

$$c_{p\Gamma \text{ ср}}(T_0^*) = \left[\frac{1.25 + 2.2\alpha}{\alpha \cdot 10^5}(T_0^* + 450) + 0.218\right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 =$$

$$= \left[\frac{1.25 + 2.2 \cdot 2.642}{2.642 \cdot 10^5}(1095.352 + 450) + 0.218\right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 = 1085.731 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$$

45.2. Определим значение средней теплоемкости при температуре T_2 :

$$c_{p\Gamma \text{ ср}}(T_2) = \left[\frac{1.25 + 2.2\alpha}{\alpha \cdot 10^5}(T_2 + 450) + 0.218\right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 =$$

$$\left[\frac{1.25 + 2.2 \cdot 2.642}{2.642 \cdot 10^5}(950.224 + 450) + 0.218\right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 = 1069.487 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$$

45.3. Новое значение средней теплоемкости в интервале температур от T_2 до T_0^* :

$$c'_{p\Gamma} = \frac{c_{p\Gamma \text{ ср}}(T_2)(T_2 - T_0) - c_{p\Gamma \text{ ср}}(T_0^*)(T_0^* - T_0)}{T_2 - T_0^*} =$$

$$\frac{1069.487 \cdot (950.224 - 273) - 1085.731 \cdot (1095.352 - 273)}{950.224 - 1095.352} = 1161.902 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$$

45.4. Новое значение показателя адиабаты:

$$k'_b = \frac{c'_{p\Gamma}}{c'_{p\Gamma} - R_{\Gamma}} = \frac{1161.902}{1161.902 - 287} = < St1KGasLong$$

46. Определим погрешность определения показателя адиабаты газа в процессе расширения в ступени:

$$\delta = \frac{|k'_{\Gamma} - k_{\Gamma}|}{k_{\Gamma}} \cdot 100\% = \frac{|1.3286 - 1.3287|}{1.3287} \cdot 100\% = 0.003\% < 5\%$$

Погрешность определения показателя адиабаты в пределах допуска.

3.2 Расчет второй ступени

Исходные данные для расчета первой ступени:

Величина	Обозначение	Размерность	Значение
Реактивность ступени	ρ	-	0.33
Радиальный зазор	δ_r	-	0.00092
Средний диаметр на входе в РК	D_1	м	0.3577
Средний диаметр на выходе из РК	D_2	м	0.3594
Длина лопатки на входе в РК	l_1	м	0.0852
Длина лопатки на выходе из РК	l_2	м	0.0919
Статическое давление на выходе из ступени	p_2	МПа	0.096

1. Примем значение показателя адиабаты:

$$k_{\Gamma} = 1.339$$

2. Теплоемкость газа при данном значении коэффициента адиабаты:

$$c_{pr} = \frac{k_{\Gamma} R_{\Gamma}}{k_{\Gamma} - 1} = \frac{1.339 \cdot 287}{1.339 - 1} = 1135.0 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

3. Определим давление торможения на входе вступень по значению статического давления на выходе из предыдущей ступени:

$$p_0^* = p_0 \left(1 + \frac{c_0^2}{2c_p T_0} \right)^{\frac{k_{\Gamma}}{k_{\Gamma} - 1}} = 0.182 \left(1 + \frac{149.49^2}{2 \cdot 1135.0 \cdot 950.224} \right)^{\frac{1.339}{1.339 - 1}} = 0.189$$

4. Определим теплоперепад на ступени:

$$H_t = c_{pr} T_0^* \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_0^*} \right)^{\frac{k_{\Gamma} - 1}{k_{\Gamma}}} \right] = 1135.0963.174 \left[1 - \left(\frac{0.096}{0.189} \right)^{\frac{1.339 - 1}{1.339}} \right] = 0.173$$

5. Определим теплоперепад на сопловом аппарате:

$$H_c = (1 - \rho) H_t = (1 - 0.33) \cdot 0.173 \cdot 10^6 = 0.116 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$$

6. Определим скорость действительного истечения из СА:

$$c_1 = \phi \sqrt{2H_c} = 0.97 \cdot \sqrt{20.116 \cdot 10^6} = 467.261 \text{ м}/\text{с}$$

7. Определим температуру на выходе из СА:

$$T_1 = T_0^* - \frac{c_1^2}{2c_{pr}} = 963.174 - \frac{467.261^2}{2 \cdot 1135.0} = 867.009 \text{ К}$$

8. Определим температуру конца адиабатного расширения:

$$T_1' = T_0^* - \frac{H_c}{c_{pr}} = 963.174 - \frac{0.116 \cdot 10^6}{1135.0} = 861.0 \text{ К}$$

9. Определим давление на выходе из СА:

$$p_1 = p_0^* \left(\frac{T_1'}{T_0^*} \right)^{\frac{k_{\Gamma}}{k_{\Gamma} - 1}} = 0.189 \cdot \left(\frac{861.0}{963.174} \right)^{\frac{1.339}{1.339 - 1}} = 0.122 \text{ МПа}$$

10. Определим плотность газа на выходе из СА:

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R_{\Gamma} T_1} = \frac{0.122 \cdot 10^6}{287 \cdot 867.009} = 0.488 \text{ кг}/\text{м}^3$$

11. Определим площадь входа в РК:

$$A_1 = \pi D_1 l_1 = \pi \cdot 0.3577 \cdot 0.0852 = 0.09574 \text{ м}^2$$

12. Определим осевую составляющую абсолютной скорости на входе в РК:

$$c_{1a} = \frac{G}{\rho_1 A_1} = \frac{7.0}{0.488 \cdot 0.09574} = 154.705$$

13. Определим угол на выходе из СА:

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{c_{1a}}{c_1} = \arcsin \frac{154.705}{467.261} = 19.335^\circ$$

14. Определим окружную скорость на среднем диаметре на входе в РК:

$$u_1 = \frac{\pi D_1 n}{60} = \frac{\pi \cdot 0.3577 \cdot 18000.0}{60} = 337.11 \text{ м/с}$$

15. Определим относительную скорость на входе в РК:

$$w_1 = \sqrt{c_1^2 + u_1^2 - 2c_1 u_1 \cos \alpha_1} = \sqrt{467.261^2 + 337.11^2 - 2 \cdot 467.261 \cdot 337.11 \cdot \cos 19.335^\circ} = 186.3 \text{ м/с}$$

16. Определим теплоперепад на РК:

$$H_{\pi} = H_{\pi} \rho \frac{T_1}{T'_1} = 0.173 \cdot 10^6 \cdot 0.33 \cdot \frac{867.009}{861.0} = 0.058 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

17. Определим площадь на выходе из РК:

$$A_2 = \pi D_2 l_2 = \pi \cdot 0.3594 \cdot 0.0919 = 0.103716 \text{ м}^2$$

18. Определим окружную скорость на среднем диаметре на выходе из РК:

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60} = \frac{\pi \cdot 0.3594 \cdot 18000.0}{60} = 338.685 \text{ м/с}$$

19. Определим относительную скорость истечения газа из РК:

$$w_2 = \psi \sqrt{w_1^2 + 2H_{\pi} + (u_2^2 - u_1^2)} = 0.97 \cdot \sqrt{186.3^2 + 2 \cdot 0.058 \cdot 10^6 + (338.685^2 - 337.11^2)} = 376.762 \text{ м/с}$$

20. Определим статическую температуру на выходе из РК:

$$T_2 = T_1 + \frac{(w_1^2 - w_2^2) + (u_2^2 - u_1^2)}{2c_{p\Gamma}} = 867.009 + \frac{(186.3^2 - 376.762^2) + (338.685^2 - 337.11^2)}{2 \cdot 1135.0} = 820.242 \text{ К}$$

21. Определим статическую температуру при адиабатическом процессе в РК:

$$T'_2 = T_1 - \frac{H_{\pi}}{c_{p\Gamma}} = 867.009 - \frac{0.058 \cdot 10^6}{1135.0} = 816.315 \text{ К}$$

22. Определим давление на выходе из РК:

$$p_2 = p_1 \left(\frac{T'_2}{T_1} \right)^{\frac{k_{\Gamma}}{k_{\Gamma}-1}} = 0.122 \left(\frac{816.315}{867.009} \right)^{\frac{1.339}{1.339-1}} = 0.096 \text{ МПа}$$

23. Определим плотность газа на выходе из РК:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{RT_2} = \frac{0.096 \cdot 10^6}{287 \cdot 820.242} = 0.407$$

24. Определим осевую составляющую абсолютной скорости на выходе из РК:

$$c_{2a} = \frac{G}{A_2 \rho_2} = \frac{7.0}{0.103716 \cdot 0.407} = 171.403$$

25. Определим угол в относительном движении на выходе из РК:

$$\beta_2 = \arcsin \frac{c_{2a}}{w_2} = \arcsin \frac{171.403}{376.762} = 27.061^\circ$$

26. Определим угол выхода из РК в абсолютном движении:

$$\alpha_2 = \arctan \frac{w_2 \cos \beta_2 - u_2}{c_{2a}} = \arctan \frac{376.762 \cdot \cos 27.061^\circ - 338.685}{171.403} = 91.06^\circ$$

27. Определим окружную составляющую скорости на выходе из РК:

$$c_{2u} = w_2 \cos \beta_2 - u_2 = 376.762 \cdot \cos 27.061^\circ - 338.685 = -3.17 \text{ м/с}$$

28. Определим скорость потока на выходе из РК:

$$c_2 = \sqrt{c_{2u}^2 + c_{2a}^2} = \sqrt{-3.17^2 + 171.403^2} = 171.432 \text{ м/с}$$

29. Определим работу на окружности колеса:

$$L_u = c_{1u}u_1 + c_{2u}u_2 = 440.907 \cdot 337.11 + -3.17 \cdot 338.685 = 0.148 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

30. Определим КПД на окружности колеса:

$$\eta_u = \frac{L_u}{H_t} = \frac{0.148}{0.173} = 0.8521$$

31. Определим удельные потери на статоре:

$$h_c = \left(\frac{1}{\phi^2} - 1 \right) \frac{c_1^2}{2} = \left(\frac{1}{0.97^2} - 1 \right) \frac{467.261^2}{2} = 6.857 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

32. Определим удельные потери на роторе:

$$h_p = \left(\frac{1}{\psi^2} - 1 \right) \frac{w_2^2}{2} = \left(\frac{1}{0.97^2} - 1 \right) \frac{376.762^2}{2} = 4.458 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

33. Определим удельные потери с выходной скоростью:

$$h_{\text{вых}} = \frac{c_2^2}{2} = \frac{171.432^2}{2} = 14.694 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

34. Определим удельные потери в радиальном зазоре:

$$\begin{aligned} h_z &= 1.37 \cdot (1 + 1.6\rho) \left[1 + \left(\frac{l}{D} \right)_1 \right] \frac{\delta_r}{l_2} L_u = \\ &= 1.37 \cdot (1 + 1.6 \cdot 0.33) [1 + 0.26] \frac{0.00092}{0.0659} \cdot 0.148 = 3.881 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \end{aligned}$$

35. Определим удельные потери на вентиляцию:

$$h_{\text{вент}} = \frac{1.07 D_2^2 \left(\frac{u_2}{100} \right)^3 \rho}{G} = \frac{1.07 \cdot 0.3594^2 \left(\frac{338.685}{100} \right)^3 \cdot 0.33}{7.0} = 0.000242 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

36. Определим температуру торможения за РК:

$$T_2^* = T_2 + \frac{h_z + h_{\text{вент}} + h_{\text{вых}}}{c_{pg}} = 820.242 + \frac{3.881 \cdot 10^3 + 0.000242 \cdot 10^3 + 14.694 \cdot 10^3}{1135.0} = 836.606 \text{ К}$$

37. Определим давление торможения за РК:

$$p_2^* = p_2 \left(\frac{T_2^*}{T_2} \right)^{\frac{k_{\Gamma}}{k_{\Gamma}-1}} = 0.096 \cdot \left(\frac{836.606}{820.242} \right)^{\frac{1.339}{1.339-1}} = 0.102 \text{ МПа}$$

38. Определим мощностной КПД ступени:

$$\eta_{\text{т мощн}} = \eta_u - \frac{h_3 + h_{\text{вент}}}{H_{\text{т}}} = 0.8521 - \frac{3.881 \cdot 10^3 + 0.000242 \cdot 10^3}{0.173 \cdot 10^6} = 0.8297$$

39. Определим работу ступени:

$$L_{\text{т}} = H_{\text{т}} \eta_{\text{т}} = 0.173 \cdot 10^6 \cdot 0.8297 = 0.144 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

40. Определим теплоперепад по параметрам торможения:

$$H_{\text{т}}^* = c_{\text{пр}} T_0^* \left[1 - \left(\frac{p_2^*}{p_0^*} \right)^{\frac{k_{\text{г}} - 1}{k_{\text{г}}}} \right] = 1135.0 \cdot 963.174 \left[1 - \left(\frac{0.102}{0.189} \right)^{\frac{1.339 - 1}{1.339}} \right] = 0.159 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

41. Определим КПД ступени по параметрам торможения:

$$\eta_{\text{т}}^* = \frac{L_{\text{т}}}{H_{\text{т}}^*} = \frac{0.144 \cdot 10^6}{0.159 \cdot 10^6} = 0.9053$$

42. Определим уточненное значение показателя адиабаты газа в процессе расширения в ступени:

42.1. Определим значение средней теплоемкости газа при температуре T_0^* :

$$\begin{aligned} c_{\text{пр ср}}(T_0^*) &= \left[\frac{1.25 + 2.2\alpha}{\alpha \cdot 10^5} (T_0^* + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 = \\ &= \left[\frac{1.25 + 2.2 \cdot 2.642}{2.642 \cdot 10^5} (963.174 + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 = 1070.936 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

42.2. Определим значение средней теплоемкости при температуре T_2 :

$$\begin{aligned} c_{\text{пр ср}}(T_2) &= \left[\frac{1.25 + 2.2\alpha}{\alpha \cdot 10^5} (T_2 + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 = \\ &= \left[\frac{1.25 + 2.2 \cdot 2.642}{2.642 \cdot 10^5} (820.242 + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 = 1054.939 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

42.3. Новое значение средней теплоемкости в интервале температур от T_2 до T_0^* :

$$\begin{aligned} c'_{\text{пр}} &= \frac{c_{\text{пр ср}}(T_2)(T_2 - T_0) - c_{\text{пр ср}}(T_0^*)(T_0^* - T_0)}{T_2 - T_0^*} = \\ &= \frac{1054.939 \cdot (820.242 - 273) - 1070.936 \cdot (963.174 - 273)}{820.242 - 963.174} = 1132.57 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

42.4. Новое значение показателя адиабаты:

$$k'_{\text{в}} = \frac{c'_{\text{пр}}}{c'_{\text{пр}} - R_{\text{г}}} = \frac{1132.57}{1132.57 - 287} = 1.3401$$

43. Определим погрешность определения показателя адиабаты газа в процессе расширения в ступени:

$$\delta = \frac{|k'_{\text{г}} - k_{\text{г}}|}{k_{\text{г}}} \cdot 100\% = \frac{|1.3401 - 1.339|}{1.339} \cdot 100\% = 0.078\% < 5\%$$

Погрешность определения показателя адиабаты в пределах допуска.

3.3 Вычисление интегральных параметров турбины

1. Определим среднее значение коэффициента адиабаты и теплоемкости в интервале температур от $T_{\text{тк}}^*$ до $T_{\text{т}}$:

- 1.1. Значение средней теплоемкости в интервале температур от $T_{\text{тк}}^*$ до $T_{\text{т}}$:

$$c_{p\Gamma} = \frac{c_{p\Gamma \text{ ср}}(T_{\text{т}})(T_{\text{т}} - T_0) - c_{p\Gamma \text{ ср}}(T_{\text{тк}}^*)(T_{\text{тк}}^* - T_0)}{T_{\text{т}} - T_{\text{тк}}^*} =$$

$$= \frac{1054.939 \cdot (820.242 - 273) - 1085.731 \cdot (1095.352 - 273)}{820.242 - 1095.352} = 1215.538 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$$

- 1.2. Значение показателя адиабаты:

$$k_{\text{в}} = \frac{c_{p\Gamma}}{c_{p\Gamma} - R_{\Gamma}} = \frac{1215.538}{1215.538 - 287} = 1.31$$

2. Работа турбины:

$$L_{\text{т}} = L_{\text{т1}} + L_{\text{т2}} = 0.154 \cdot 10^6 + 0.144 \cdot 10^6 = 0.297 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$$

3. Теплоперепад в турбине:

$$H_t = c_p T_{\text{тк}}^* \left[1 - \left(\frac{p_{\Gamma}^*}{p_{\Gamma}} \right)^{\frac{1-k_{\Gamma}}{k_{\Gamma}}} \right] = 1215.538 \cdot 1095.352 \left[1 - \left(\frac{0.337}{0.096} \right)^{\frac{1-1.31}{1.31}} \right] = 0.342 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$$

4. КПД турбины по статическим параметрам:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{L_{\text{т}}}{H_{\text{т}}} = \frac{0.297}{0.342} = 0.8683$$

5. Лопаточный КПД турбины:

$$\eta_{\text{л}} = \frac{L_{\text{т}} + \frac{c_{\text{т}}^2}{2}}{H_{\text{т}}} = \frac{0.297 \cdot 10^6 + \frac{171.432^2}{2}}{0.342 \cdot 10^6} = 0.9113$$

6. Определим среднее значение коэффициента адиабаты и теплоемкости в интервале температур от $T_{\text{тк}}^*$ до $T_{\text{т}}^*$:

- 6.1. Значение средней теплоемкости при температуре $T_{\text{т}}^*$:

$$c_{p\Gamma \text{ ср}}(T_{\text{т}}^*) = \left[\frac{1.25 + 2.2\alpha}{\alpha \cdot 10^5} (T_{\text{т}}^* + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 =$$

$$= \left[\frac{1.25 + 2.2 \cdot 2.642}{2.642 \cdot 10^5} (836.606 + 450) + 0.218 \right] \cdot 4.187 \cdot 10^3 = 1056.77 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$$

- 6.2. Значение средней теплоемкости в интервале температур от $T_{\text{тк}}^*$ до $T_{\text{т}}^*$:

$$c_{p\Gamma} = \frac{c_{p\Gamma \text{ ср}}(T_{\text{т}}^*)(T_{\text{т}}^* - T_0) - c_{p\Gamma \text{ ср}}(T_{\text{тк}}^*)(T_{\text{тк}}^* - T_0)}{T_{\text{т}}^* - T_{\text{тк}}^*} =$$

$$= \frac{1056.77 \cdot (836.606 - 273) - 1085.731 \cdot (1095.352 - 273)}{836.606 - 1095.352} = 1217.408 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$$

- 6.3. Значение показателя адиабаты:

$$k_{\text{в}} = \frac{c_{p\Gamma}}{c_{p\Gamma} - R_{\Gamma}} = \frac{1217.408}{1217.408 - 287} = 1.309$$

7. Теплоперепад по параметрам торможения:

$$H_t^* = c_p T_{\Gamma}^* \left[1 - \left(\frac{p_{\Gamma}}{p_{\Gamma}^*} \right)^{\frac{1-k_{\Gamma}}{k_{\Gamma}}} \right] = 1217.408 \cdot 1095.352 \left[1 - \left(\frac{0.337}{0.102} \right)^{\frac{1-1.309}{1.309}} \right] = 0.328 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$$

8. КПД турбины по параметрам торможения:

$$\eta_{\text{т}}^* = \frac{L_{\text{т}}}{H_t^*} = \frac{0.297}{0.328} = 0.9066$$

9. Мощность турбины:

$$N = L_{\text{т}} G \eta_{\text{м}} = 0.297 \cdot 7.0 \cdot 0.99 = 2.127 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

4 Профилирование первой ступени турбины компрессора

Исходными данными для данного этапа проектирования турбины являются результаты расчета по средней линии тока.

Ступень была спрофилирована по закону $\alpha_1 = \text{const}$.

Определим треугольники скоростей на произвольном радиусе лопатки.

1. В этом случае значения абсолютной скорости на входе на рабочие лопатки на произвольном радиусе определялись по следующим формулам (в приведенных ниже формулах значения со штрихом относятся к среднему радиусу):

$$c_{1u} = c'_{1u} \left(\frac{r'}{r} \right)^{\cos^2 \alpha_1}; \quad c_{1a} = c'_{1a} \left(\frac{r'}{r} \right)^{\cos^2 \alpha_1}; \quad c_1 = c'_1 \left(\frac{r'}{r} \right)^{\cos^2 \alpha_1}$$

2. Окружная скорость рабочей лопатки на произвольном радиусе была определена по закон вращения твердого тела:

$$u = u' \frac{r}{r'}$$

3. Относительная скорость на произвольном радиусе на входе в рабочие лопатки была определена по следующим формулам:

$$w_{1u} = c_{1u} - u; \quad w_{1a} = c_{1a}; \quad w_1 = \sqrt{w_{1u}^2 + w_{1a}^2}$$

4. Абсолютная скорость на выходе из рабочих лопаток была определена по условию постоянства работы, отводимой от газа на различных радиусах лопатки.

По формуле Эйлера для правила отсчета углов, принятого в теории турбин удельная работа на окружности колеса L_u определяется следующей формулой:

$$L_u = c_{1u} + c_{2u}$$

Таким образом, зная работу на окружности колеса на среднем радиусе лопатки L'_u , мы можем определить значение окружной скорости на выходе из рабочих лопаток:

$$c_{2u} = \frac{L'_u}{u} - c_{1u} = \frac{L'_u}{u'} \frac{r'}{r} - c'_{1u} \left(\frac{r'}{r} \right)^{\cos^2 \alpha_1}$$

5. Используя значения окружной и осевой скорости на среднем радиусе лопатки, определим значение осевой скорости на выходе из рабочих лопаток, проинтегрировав уравнение Бернулли для цилиндрического течения, записанное в дифференциальной форме, и полагая температуры торможения постоянными по радиусу:

$$c_{2a}^2 = c_{2a}'^2 + c_{2u}'^2 - c_{2u}^2 - 2 \int_{r'}^r \frac{c_{2u}^2}{r} dr$$

Введем обозначения $a = \frac{L'_u}{u}$; $b = c'_{1u}$.

Тогда после интегрирования получим:

$$c_{2a} = c_{2a}'^2 + c_{2u}'^2 - c_{2u}^2 + \left[-a^2 \left(\frac{r'}{r} \right)^2 + \frac{4ab}{1 + \cos^2 \alpha_1} \left(\frac{r'}{r} \right)^{1 + \cos^2 \alpha_1} - \frac{b^2}{\cos^2 \alpha_1} \left(\frac{r'}{r} \right)^{2 \cos^2 \alpha_1} \right] \Big|_{r'}$$

6. Значения проекций относительной скорости на выходе из лопаток находим так же, как и значения на входе в рабочие лопатки.

Определим профили давления и реактивности на произвольном радиусе лопатки:

1. Запишем выражение для числа Маха на произвольном радиусе лопатки с учетом постоянства температуры торможения:

$$M_{1,2} = \frac{c_{1,2}}{\sqrt{kR \left(T'_{1,2} + \frac{c_{1,2}^2 - c_{1,2}'^2}{c_p} \right)}}$$

2. Запишем выражение для давления на произвольном радиусе лопатки, используя ГДФ давления:

$$p_{1,2} = p'_{1,2} \frac{\pi(M_{1,2}, k)}{\pi(M'_{1,2}, k)}$$

3. Запишем выражение для статической температуры на произвольном радиусе лопатки, используя ГДФ температуры:

$$T_{1,2} = T'_{1,2} \frac{\tau(M_{1,2}, k)}{\tau(M'_{1,2}, k)}$$

4. Таким образом, зная степень понижения давления на среднем и произвольном радиусе лопатки, мы можем определить степень реактивности на произвольном радиусе:

$$r = \frac{\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\pi'^{\frac{k-1}{k}} - 1} r'$$

Построим графики изменения углов потока и степени реактивности, а также треугольники скоростей на различных радиусах по высоте лопатки.

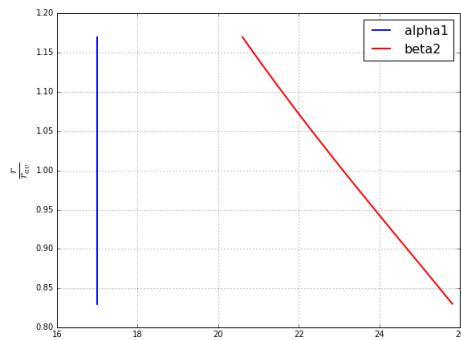


Рис. 6: Изменение углов α_1 и β_2 по радиусу

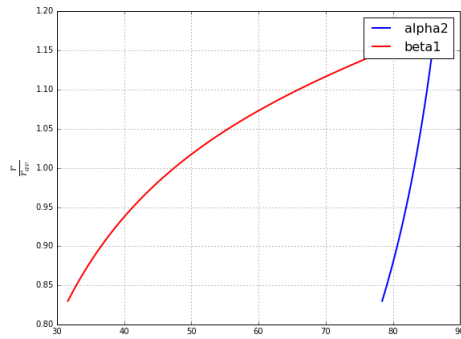


Рис. 7: Изменение углов α_2 и β_1 по радиусу

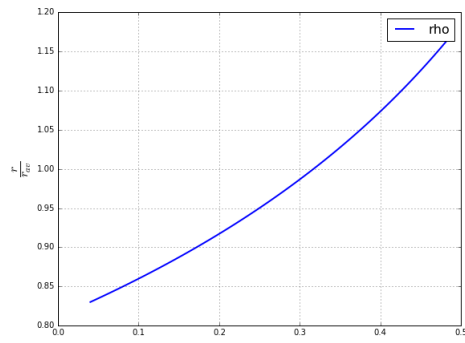


Рис. 8: Изменение степени реактивности по радиусу

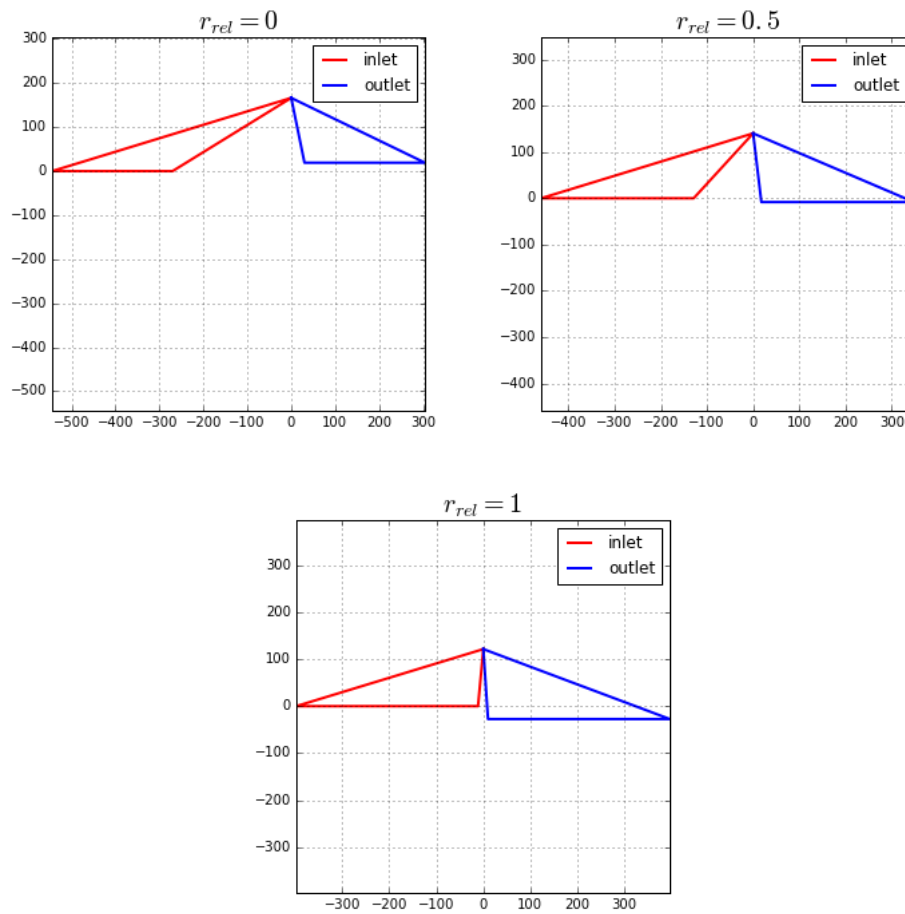


Рис. 9: Треугольники скоростей

5 Расчет на прочность диска первой ступени

5.1 Исходные данные для расчета

1. Частота вращения: $n = 18000.0$ об/мин
2. Зависимость толщины диска от радиуса: $h(r)$
3. Сила инерции, действующая на лопатку: $P_{\text{лоп}} = 39960.0$ Н
4. Ширина хвостовика: $h_{m-1} = 0.01587$ м
5. Радиусы хвостовика: $r_1 = 0.12786$ м и $r_2 = 0.13864$ м
6. Температура на внутреннем радиусе: $T_1 = 200$ К
7. Температура на внешнем радиусе: $T_m = 700$ К
8. Закон изменения температуры диска по радиусу: Примем, что температура диска изменяется по радиусу по закону квадратной параболы:

$$T(r) = T_1 + (T_m - T_1) \frac{r^2}{r_m^2}$$

9. Число лопаток: $z_{\text{л}} = 48$
10. Параметры материала:

10.1. Материал - сплав ЭИ698.

10.2. Плотность: $\rho = 8320$ кг/м³

10.3. Коэффициент Пуассона: $\mu = 0.3$

10.4. Зависимость модуля Юнга от температуры:

T, К	20	400	500	600	700	800
E, МПа	$2 \cdot 10^5$	$1.82 \cdot 10^5$	$1.75 \cdot 10^5$	$1.65 \cdot 10^5$	$1.55 \cdot 10^5$	$1.4 \cdot 10^5$

10.5. Зависимость коэффициента линейного расширения от температуры

T, К	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$\alpha, 10^{-6} 1/\text{К}$	11	11.4	11.7	12.1	12.4	12.7	13.4	13.9	14.7

10.6. Зависимость предела временной прочности от температуры

T, К	20	400	500	600	700
$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	1220	1180	1160	1120	1040

5.2 Алгоритм расчета

1. Определяем силу нагрузку на периферии:

$$p_m = \frac{P_{\text{лоп}} z_{\text{л}}}{2\pi r_2 h_{m-1}} + \rho \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \frac{r_2^3 - r_1^3}{3r_1} = \frac{39960.0 \cdot 48}{2\pi \cdot 0.13864 \cdot 0.01587} + 8320 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 18000.0}{30} \right)^2 \frac{0.13864^3 - 0.12786^3}{30.12786} = 198.13 \text{ МПа}$$

2. Разобьем диск на $m - 1$ участков постоянной толщины.
3. Зададим значение $\sigma_r^{1,1} = \sigma_t^{1,1} = 100..200$ МПа
4. Для каждого из участков решим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} S_{i,i} = \sigma_r^{i,i} + \sigma_t^{i,i}, \\ D_{i,i} = \sigma_r^{i,i} - \sigma_t^{i,i}, \\ S_{i,i+1} = S_{i,i} - \frac{1+\mu}{2} \rho_i \omega^2 (r_{i+1}^2 - r_i^2) - E_i (\theta_{i+1} - \theta_i), \\ D_{i,i+1} = D_{i,i} \frac{r_i^2}{r_{i+1}^2} + \frac{1-\mu}{4} \rho \omega^2 \left(r_{i+1}^2 - \frac{r_i^4}{r_{i+1}^2} \right) + 2 \frac{E_i}{r_{i+1}^2} \int_{r_i}^{r_{i+1}} \theta r dr - E_i \left(\theta_{i+1} - \theta_i \frac{r_i^2}{r_{i+1}^2} \right), \\ \sigma_t^{i,i+1} = \frac{S_{i,i+1} + D_{i,i+1}}{2}, \\ \sigma_r^{i,i+1} = \frac{S_{i,i+1} - D_{i,i+1}}{2}, \\ \sigma_r^{i+1,i+1} = \sigma_r^{i,i+1} \frac{h_i}{h_{i+1}}, \\ \sigma_t^{i+1,i+1} = \mu \sigma_t^{i,i+1} \frac{h_i}{h_{i+1}} + \frac{E_{i+1}}{E_i} \left(\sigma_t^{i,i+1} - \mu \sigma_r^{i,i+1} \right), \end{cases}$$

где $\theta(r_i) = \alpha(r_i) (T(r_i) - T_0)$ - температурные деформации, а $T_0 = 20^\circ \text{C}$

5. Повторяем пункты 3 и 4 при $\theta = 0$ и $\omega = 0$

6. Находим коэффициент k :

$$k = \frac{p_m - (\sigma_r^{m-1,m})_I}{(\sigma_r^{m-1,m})_{II}}$$

7. Находим значения напряжений на каждом из участков:

$$\sigma_r^{i,j} = (\sigma_r^{i,j})_I + k(\sigma_r^{m-1,m})_{II}$$

$$\sigma_t^{i,j} = (\sigma_t^{i,j})_I + k(\sigma_t^{m-1,m})_{II}$$

5.3 Результаты расчета

1. Результаты первого расчета.

i	r_i , мм	$\sigma_r^{i,j}$, МПа	$\sigma_t^{i,j}$, МПа
0	0.0	100.0	100.0
0	6.3	98.8	97.6
1	6.3	101.5	98.4
1	12.7	97.2	91.8
2	12.7	100.0	92.6
2	19.0	93.2	81.1
3	19.0	96.0	81.8
3	25.4	86.8	65.5
4	25.4	89.5	66.2
4	31.7	77.9	44.8
5	31.7	80.3	45.5
5	38.1	66.4	19.1
6	38.1	68.5	19.8
6	44.4	52.2	-11.6
7	44.4	53.9	-11.0
7	50.7	35.2	-47.6
8	50.7	36.1	-47.1
8	57.1	15.1	-89.0
9	57.1	15.4	-88.4
9	63.4	-8.1	-136.9
10	63.4	-8.3	-136.1
10	69.8	-34.3	-190.3
11	69.8	-35.1	-189.4
11	76.1	-63.5	-249.4
12	76.1	-65.9	-248.4
12	82.5	-96.8	-313.8
13	82.5	-100.6	-312.2
13	88.8	-133.6	-382.0
14	88.8	-139.1	-379.2
14	95.1	-174.3	-454.8
15	95.1	-181.7	-451.3
15	101.5	-218.9	-532.6
16	101.5	-228.6	-526.8
16	107.8	-267.8	-613.7
17	107.8	-280.2	-604.7
17	114.2	-321.0	-698.9
18	114.2	-336.7	-688.0
18	120.5	-379.7	-804.1
19	120.5	-294.2	-759.1
19	126.9	-343.0	-879.3

2. Результаты второго расчета

i	r_i , мм	$\sigma_r^{i,j}$, МПа	$\sigma_t^{i,j}$, МПа
0	0.000000	100.000000	100.000000
0	6.300000	100.000000	100.000000
1	6.300000	102.800000	100.800000
1	12.700000	102.000000	101.500000
2	12.700000	104.900000	102.300000
2	19.000000	104.200000	103.100000
3	19.000000	107.300000	103.900000
3	25.400000	106.500000	104.600000
4	25.400000	109.700000	105.400000
4	31.700000	109.000000	106.200000
5	31.700000	112.400000	107.000000
5	38.100000	111.500000	107.800000
6	38.100000	115.100000	108.700000
6	44.400000	114.300000	109.500000
7	44.400000	118.100000	110.300000
7	50.700000	117.200000	111.200000
8	50.700000	120.300000	111.800000
8	57.100000	119.400000	112.700000
9	57.100000	121.900000	113.100000
9	63.400000	121.100000	113.900000
10	63.400000	123.700000	114.200000
10	69.800000	122.900000	115.000000
11	69.800000	125.800000	115.400000
11	76.100000	125.000000	116.200000
12	76.100000	129.700000	117.100000
12	82.500000	128.800000	118.000000
13	82.500000	133.800000	118.800000
13	88.800000	132.800000	119.800000
14	88.800000	138.200000	120.400000
14	95.100000	137.100000	121.500000
15	95.100000	142.900000	122.200000
15	101.500000	141.700000	123.400000
16	101.500000	148.000000	123.800000
16	107.800000	146.600000	125.200000
17	107.800000	153.400000	125.300000
17	114.200000	151.900000	126.800000
18	114.200000	159.300000	126.900000
18	120.500000	157.700000	128.600000
19	120.500000	122.200000	115.700000
19	126.900000	121.900000	116.000000

3. Значение коэффициента k :

$$k = \frac{p_m - (\sigma_r^{m-1,m})_I}{(\sigma_r^{m-1,m})_{II}} = \frac{198.13 - -343.03}{121.861} = 4.4408$$

4. Значения напряжений на участках после пересчета.

i	r_i , мм	$\sigma_r^{i,j}$, МПа	$\sigma_t^{i,j}$, МПа
0	0.000000	544.100000	544.100000
0	6.300000	542.900000	542.900000
1	6.300000	557.900000	546.000000
1	12.700000	550.300000	550.300000
2	12.700000	566.000000	547.100000
2	19.000000	556.100000	556.100000
3	19.000000	572.300000	543.100000
3	25.400000	559.900000	559.900000
4	25.400000	576.800000	534.300000
4	31.700000	561.800000	561.800000
5	31.700000	579.300000	520.700000
5	38.100000	561.700000	561.700000
6	38.100000	579.800000	502.300000
6	44.400000	559.600000	559.600000
7	44.400000	578.200000	479.000000
7	50.700000	555.500000	555.500000
8	50.700000	570.200000	449.500000
8	57.100000	545.200000	545.200000
9	57.100000	556.700000	413.700000
9	63.400000	529.500000	529.500000
10	63.400000	540.900000	371.100000
10	69.800000	511.300000	511.300000
11	69.800000	523.700000	323.100000
11	76.100000	491.600000	491.600000
12	76.100000	510.100000	271.400000
12	82.500000	475.100000	475.100000
13	82.500000	493.800000	215.200000
13	88.800000	456.100000	456.100000
14	88.800000	474.800000	155.400000
14	95.100000	434.500000	434.500000
15	95.100000	453.000000	91.200000
15	101.500000	410.200000	410.200000
16	101.500000	428.500000	22.900000
16	107.800000	383.200000	383.200000
17	107.800000	401.100000	-48.400000
17	114.200000	353.500000	353.500000
18	114.200000	370.800000	-124.300000
18	120.500000	320.500000	320.500000
19	120.500000	248.400000	-245.500000
19	126.900000	198.100000	198.100000

5. Средние арифметические значения напряжений на радиусах

i	r_i , мм	σ_r^i , МПа	σ_t^i , МПа	$\sigma_{\text{ЭКВ}}^i$
0	0.000000	544.100000	544.100000	544.100000
1	6.300000	550.400000	543.900000	550.400000
2	12.700000	558.100000	544.900000	558.100000
3	19.000000	564.200000	541.000000	564.200000
4	25.400000	568.400000	532.200000	568.400000
5	31.700000	570.600000	518.600000	570.600000
6	38.100000	570.800000	500.100000	570.800000
7	44.400000	568.900000	476.800000	568.900000
8	50.700000	562.800000	448.000000	562.800000
9	57.100000	551.000000	412.600000	551.000000
10	63.400000	535.200000	370.000000	535.200000
11	69.800000	517.500000	321.800000	517.500000
12	76.100000	500.800000	269.100000	500.800000
13	82.500000	484.500000	212.700000	484.500000
14	88.800000	465.500000	152.700000	465.500000
15	95.100000	443.800000	88.100000	443.800000
16	101.500000	419.300000	19.200000	419.300000
17	107.800000	392.200000	-53.100000	421.200000
18	114.200000	362.200000	-130.000000	441.800000
19	120.500000	284.400000	-239.300000	454.200000

6. Максимальная величина эквивалентных напряжений:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^i = \sqrt{(\sigma_1^i)^2 + (\sigma_3^i)^2 - \sigma_1^i \sigma_3^i}$$

$$\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 570.773 \text{ МПа}$$

7. Минимальный коэффициент запаса по временной прочности:

$$n_{\text{вmin}} = 2.096$$

8. Коэффициенты концентраций напряжений у отверстий:

$$k_1 = 3 - \frac{d_1}{b_1} - \frac{\sigma_{r1}}{\sigma_{t1}} = 3 - \frac{0.0085}{0.0255} - \frac{537.52}{376.231} = 1.238$$

$$k_2 = 3 - \frac{d_2}{b_2} - \frac{\sigma_{r2}}{\sigma_{t2}} = 3 - \frac{0.005}{0.023} - \frac{562.983}{448.628} = 1.516$$

9. Напряжения в зонах концентрации:

$$\sigma_{tk1} = k_1 \sigma_{t1} = 1.238 \cdot 376.231 = 465.763$$

$$\sigma_{tk2} = k_2 \sigma_{t2} = 1.516 \cdot 448.628 = 671.327$$

10. Зависимость от радиуса радиальных, окружных и эквивалентных напряжений, а также коэффициента запаса по временной прочности.

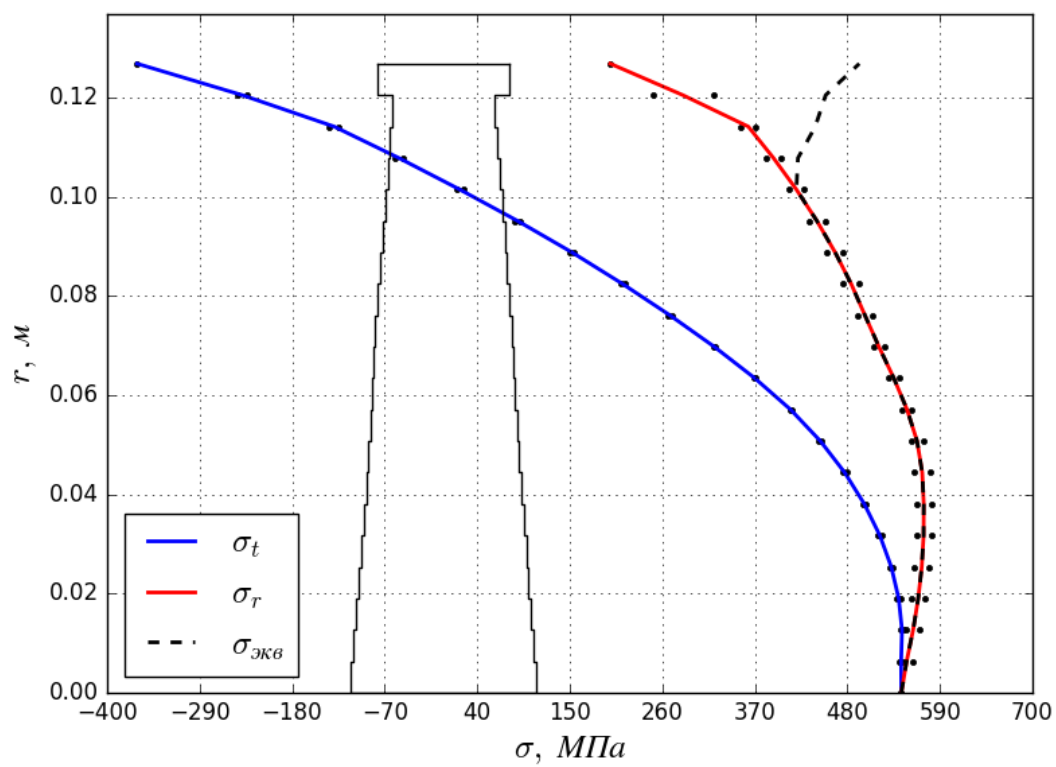


Рис. 10: Зависимость напряжений от радиуса

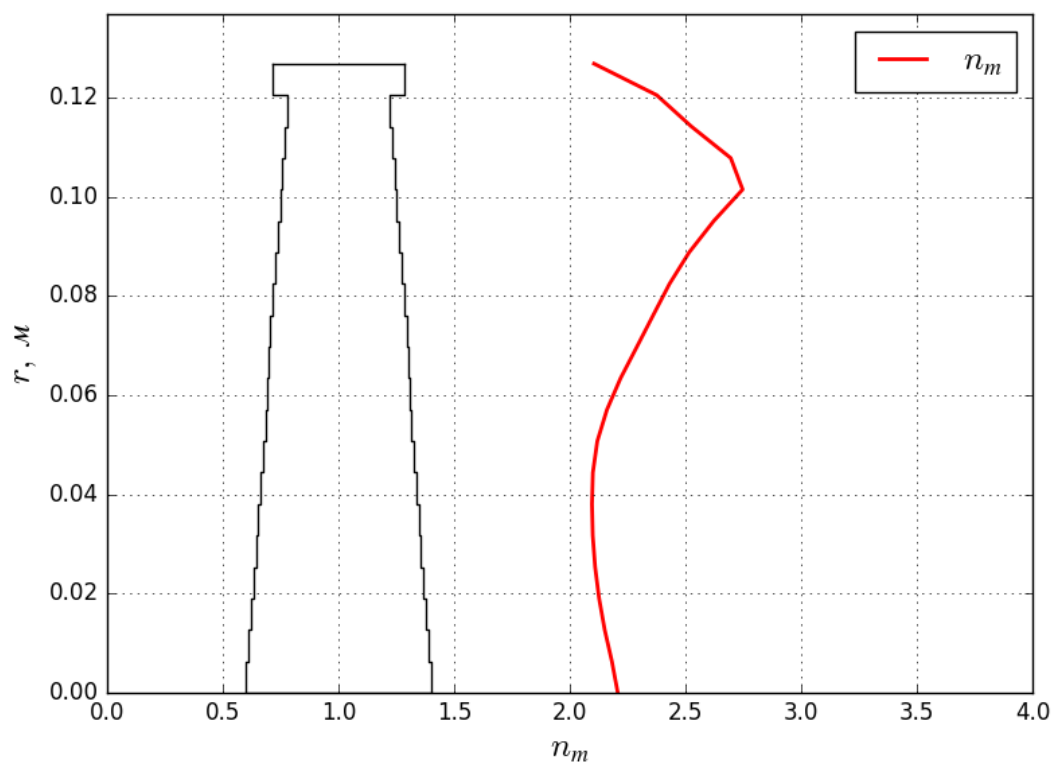


Рис. 11: Зависимость коэффициента запаса от радиуса