

УДК 621.438

doi: 10.18698/0536-1044-2020-8-44-50

# Расчетное исследование газодинамических параметров радиально-осевых турбин и их совместной работы с поршневыми двигателями

**А.Н. Русаков**

ПАО «КАДВИ»

## A Computational Study of Gas-Dynamic Parameters of Radial-Axial Turbines and Their Joint Operation with Piston Engines

**A.N. Rusakov**

PAO KADVI

Радиально-осевые (центростремительные) турбины нашли широкое применение в различных областях промышленности, энергетики и транспорта. Однако они требуют совершенствования характеристик и прежде всего повышения коэффициента полезного действия. Для расчета газодинамических параметров и характеристик центростремительной турбины использован разностный итерационный метод. Рассмотрена совместная работа четырехтактного поршневого двигателя и импульсной центростремительной турбины, коэффициент полезного действия которой сильно зависит от ее геометрических особенностей. Исследовано влияние изогнутости лопаток, отношения высоты лопаток рабочего колеса на выходе к высоте лопаток на входе, а также количества лопаток рабочего колеса и соплового аппарата на коэффициент полезного действия турбины. Предложен подход к выбору оптимальных геометрических параметров, обеспечивающих наибольший коэффициент полезного действия проектируемой центростремительной турбине при совместной работе с четырехтактным поршневым двигателем.

**Ключевые слова:** центростремительные турбины, характеристики турбины, КПД турбины, геометрические параметры, импульсная турбина, четырехтактный поршневой двигатель

Radial-axial (centripetal) turbines are widely used in various fields of industry, energy and transport, but their characteristics require improvement, above all increasing the efficiency factor. A differential iterative calculation method is used to calculate the gas dynamic parameters and characteristics of centripetal turbines. The joint operation of a pulsed centripetal turbine and a four-stroke piston engine is examined. The efficiency of the centripetal turbine is strongly dependent on the combination of the turbine's and piston engine's geometric features. The study examines the influence of the rotor blades curvature, the ratio of the height of the impeller blades at the outlet to the height of the blades at the entrance, and the number of blades of the impeller and the nozzle device on the turbine efficiency. An approach to the selection of the optimal geometric parameters that provide the highest efficiency of the designed centripetal turbine when it is used jointly with a four-stroke piston engine is proposed.

**Keywords:** centripetal turbines, turbine characteristics, turbine efficiency, geometrical parameters, pulse turbine, four-stroke piston engine

Радиально-осевые или центробежные турбины (ЦСТ) [1] нашли широкое применение в различных областях промышленности, энергетики и транспорта. Однако они требуют совершенствования характеристик и прежде всего повышения коэффициента полезного действия (КПД).

Цель работы — получение технологичной и простой в изготовлении реактивной ЦСТ с КПД, превышающим среднее значение КПД турбин такого типа, а также исследование ее газодинамических параметров ЦСТ.

Под технологичностью понимается достижение высокого КПД турбины с наименьшими затратами на обработку рабочего колеса (РК) за счет отсутствия спрямляющего аппарата на выходе и применения прямых лопаток.

Для расчетно-теоретического исследования выбраны разностный итерационный метод [2] и язык программирования Фортран. Используются основные дифференциальные уравнения аэрогидродинамики, в частности, уравнения движения элементов объема газа [3]

$$\frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} \mu \left( \frac{\partial W_y}{\partial x} + \frac{\partial W_x}{\partial y} \right) + \mu \left( \frac{\partial W_y}{\partial x} - \frac{\partial W_x}{\partial y} \right) = 0,$$

где  $\partial W_x/\partial x$ ,  $\partial W_y/\partial y$  — линейные деформации частицы;  $\mu(\partial W_y/\partial x + \partial W_x/\partial y)$  — вращательная деформация частицы;  $\mu(\partial W_y/\partial x - \partial W_x/\partial y)$  — угловая деформация частицы;

Для численного моделирования в двух- и трехмерной постановках [4] использованы полярная и цилиндрическая системы координат (СК) [5] и уравнение

$$\frac{\partial W_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_\phi}{\partial \phi} + \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial W_r}{\partial \phi} + \frac{\partial W_\phi}{\partial r} \right) + \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial W_r}{\partial \phi} - \frac{\partial W_\phi}{\partial r} \right) = 0,$$

где  $\partial W_r/\partial r$ ,  $\partial W_\phi/\partial \phi$  — линейные деформации частицы;  $\mu[(1/r)\partial W_r/\partial \phi + \partial W_\phi/\partial r]$  — вращательная деформация частицы;  $\mu[(1/r)\partial W_r/\partial \phi - \partial W_\phi/\partial r]$  — угловая деформация частицы.

Для ускоренного вычисления характеристик ЦСТ применена полярная СК, так как узлы в ней находятся в одной плоскости, а расчет происходит быстрее, чем в цилиндрической СК. При этом в полярной СК не учитываются некоторые закономерности тече-

ния потока в турбине, которые рассмотрены далее.

Для верификации составленной программы выполнен гидродинамический расчет турбины, работающей на энергии волн [6], получена хорошая сходимость с приведенными расчетными данными (рис. 1). Расчет ЦСТ в трехмерной СК проведен для несжимаемой среды (воды) с постоянными входными данными, т. е. для не пульсирующей среды. При расчете гидравлической турбины изменены следующие параметры: динамическая вязкость среды, частота вращения и геометрия ЦСТ. Входная скорость потока подобрана.

Применение импульсных гидравлических турбин в приливной энергетике является оправданным, так как их КПД не сильно уступает КПД осевых турбин. В качестве активных лопаток может быть применен аэродинамический профиль [6–8].

В данной работе проведен расчет характеристик реактивной газовой ЦСТ. Программа составлена на базе основных уравнений аэрогидродинамики с учетом объемной, вращательной, угловой деформаций элементарных частиц среды и изменения давления.

В качестве граничных условий использовано условие прилипания, а также движение частиц параллельно границам расчетной области на внешней границе системы и замкнутость системы по окружности в начале СК. Составля-

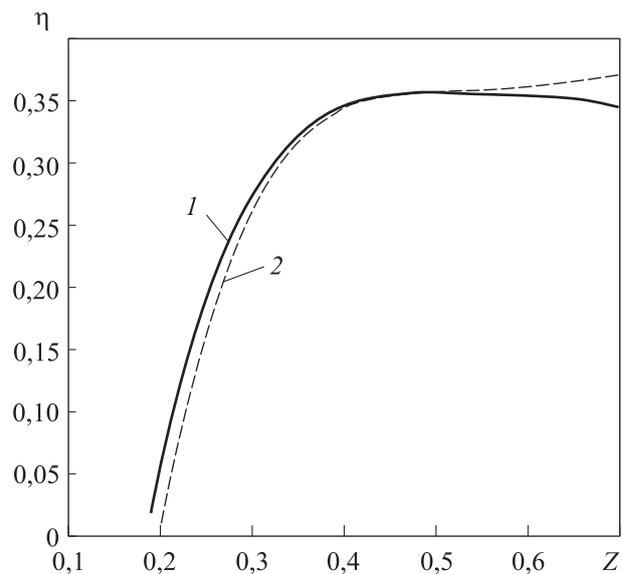


Рис. 1. Зависимость КПД турбины η от ее быстроходности Z: 1 — данные гидродинамического расчета; 2 — результаты, полученные с помощью составленной программы

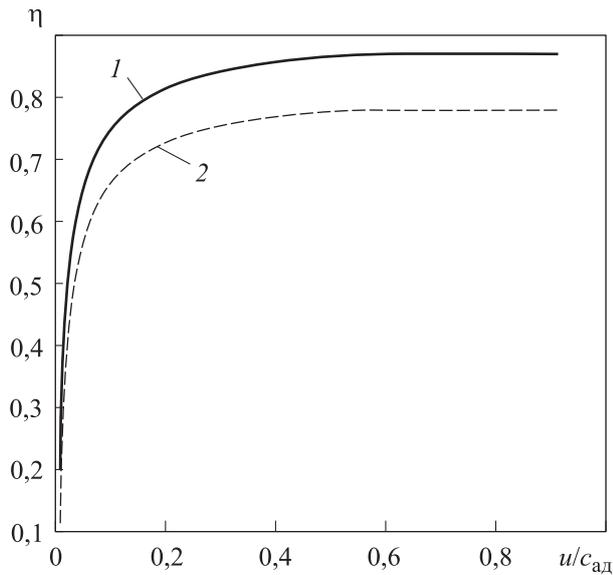


Рис. 2. Зависимости КПД турбины  $\eta$  от отношения окружной скорости к адиабатной  $u/c_{ад}$ , полученные при расчете в полярной СК (1) и цилиндрической СК (2)

ющими потерь эффективного КПД турбины являлись потери давления в сопловом аппарате (СА) и РК, потери с выходной скоростью. Также учитывалось трение о поверхности диска ЦСТ [9, 10].

Исследование влияния отношения окружной скорости к адиабатной  $u/c_{ад}$  на КПД турбины при расчете в полярной и цилиндрической СК, т. е. в дву- и трехмерной постановках. Результаты расчета показали (рис. 2), что в точке максимума вычисленные в разных системах координат КПД различаются примерно на 0,1. Это можно объяснить потерями энергии на перемешивание слоев по высоте лопатки или потерями на рециркуляцию [11] в осевом направлении, а также утечкой в зазоре РК, равном 1 мм, при расчете в цилиндрической СК.

В трехмерной постановке задачи, в отличие от двумерной, наблюдается более полная картина течения потока и присутствует броуновское движение. Эффективный КПД турбины в точке оптимума, рассчитанный в трехмерной СК, составляет 0,777 без учета поворота потока и сжимаемости, а с их учетом — 0,733 (этот график не показан). В известных источниках литературы [5] КПД аналогичных турбин составляет 0,5...0,6.

Исследование влияния количества лопаток СА и РК на КПД турбины показало (рис. 3), что графики для СА имеют оптимумы как в полярной СК ( $m = 24$ ), так и в цилиндрической СК

( $m = 25$ ). Для РК с цилиндрической СК оптимум приходится на количество лопаток  $m = 25$ , в полярной СК он явно не прослеживается.

Для сокращения времени расчета дальнейшее исследование проведено в двумерной постановке с целью определения общих закономерностей формирования (т. е. изучения параметров, на которые не влияет или влияет незначительно постановка задачи).

Исследование влияния отношения высоты лопаток РК на выходе к высоте лопаток на

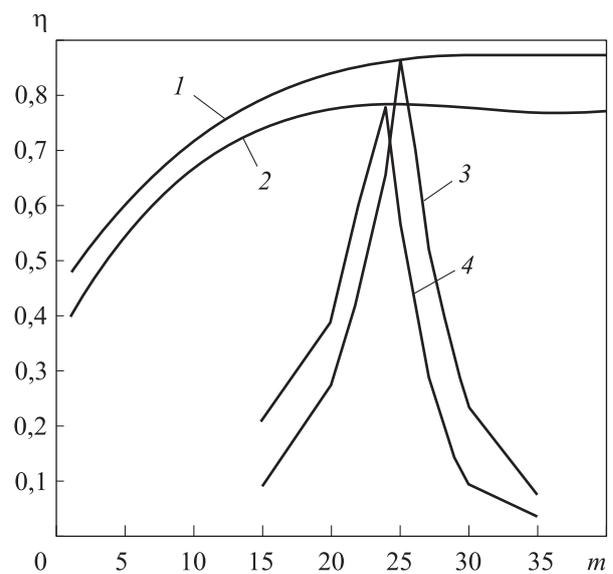


Рис. 3. Зависимости КПД турбины  $\eta$  от количества лопаток  $m$  РК (1, 2) и СА (3, 4), полученные в полярной СК (1, 3) и цилиндрической СК (2, 4)

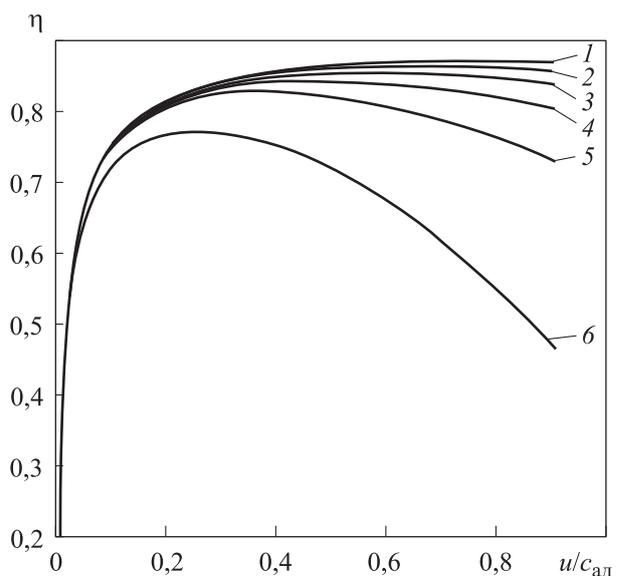


Рис. 4. Зависимость КПД турбины  $\eta$  от отношения окружной скорости к адиабатной  $u/c_{ад}$  при отношении высот лопаток РК  $\chi = 3,5$  (1), 3,0 (2), 2,5 (3), 2,0 (4), 1,5 (5) и 1,0 (6)

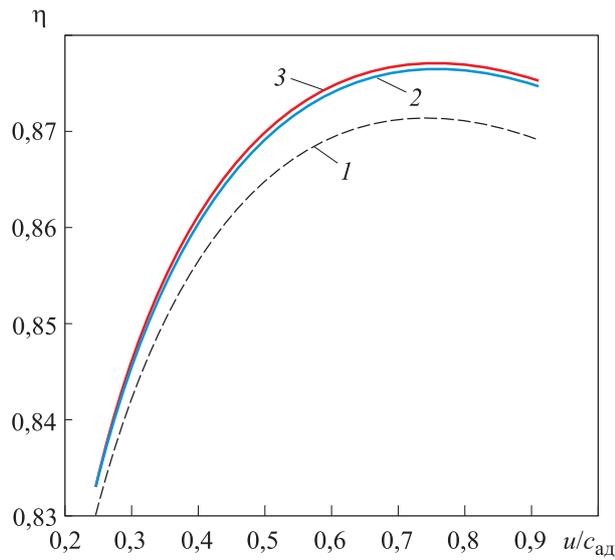


Рис. 5. Зависимость КПД турбины  $\eta$  от отношения окружной скорости к адиабатной  $u/c_{ад}$  и изогнутости лопаток РК:  
 1 — прямые лопатки; 2 — лопатки с краями, изогнутыми по направлению вращения;  
 3 — лопатки с краями, изогнутыми против направления вращения

входе  $\chi$  на КПД турбины показало, что при увеличении  $\chi$  повышается КПД турбины. Однако с ростом  $\chi$  это влияние ослабевает, и пропадает оптимум характеристики, который отчетливо наблюдается при  $\chi = 1,0$  (рис. 4).

Исследование влияния изогнутости лопаток РК на КПД турбины проведено в двумерной постановке. Анализ полученных результатов показал, что КПД турбины с лопатками, изогнутыми по краям против направления вращения, немного превышает КПД турбины с лопатками, изогнутыми по направлению вращения. В точке оптимума КПД турбины с лопатками, изогнутыми по направлению вращения, больше (на 0,0056), чем КПД турбины с прямыми лопатками. Изогнутость [12] имеет равномерное значение по высоте лопатки и составляет угол  $80^\circ$ .

Расчет параметров импульсной турбины, работающей на отработавших газах (ОГ) четырехтактного поршневого двигателя [13, 14], проведен при постоянной частоте вращения ЦСТ  $n = 20\ 000\ \text{мин}^{-1}$ . Исследована совместная работа двух агрегатов, связанных редуктором.

Поток ОГ несет энергию в форме высокого давления и температуры с разной продолжительностью цикла, так как давление истекающих из двигателя ОГ непостоянное — оно пульсирует в соответствии с чередованием тактов выпуска в разных цилиндрах. После прохождения через турбину энергия ОГ уменьшается. Перепад давления и температуры ОГ между входом и выходом из турбины преобразуется

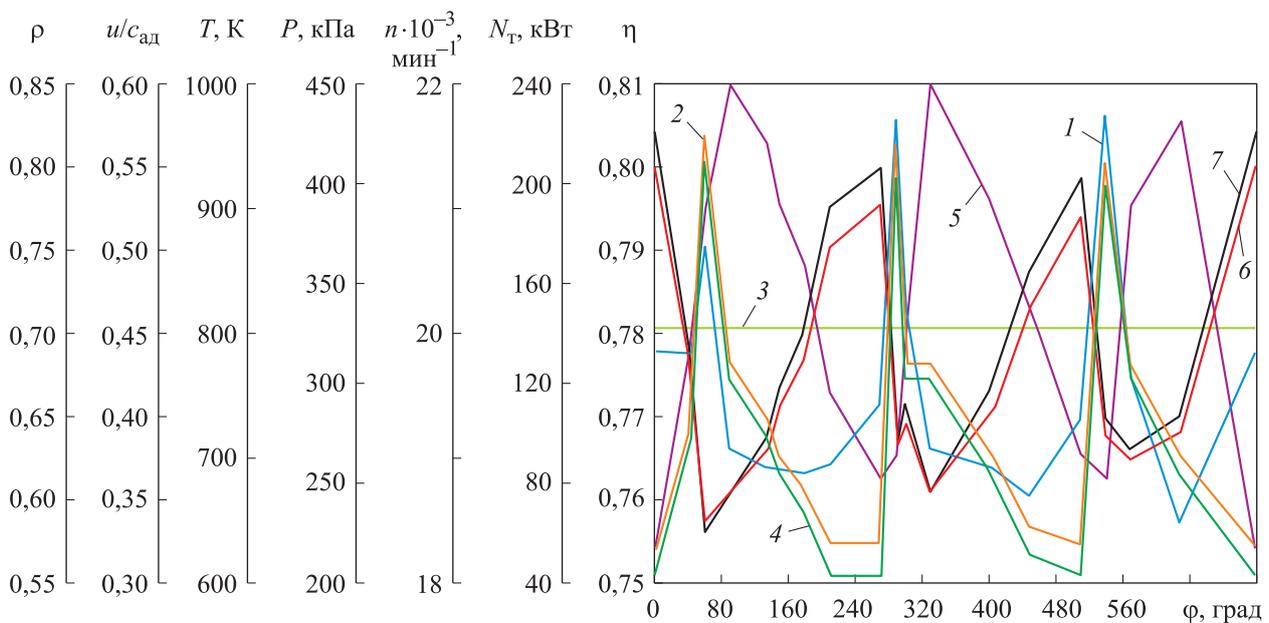


Рис. 6. Зависимости параметров импульсной ЦСТ от угла поворота коленчатого вала двигателя  $\phi$  при ее совместной работе с четырехтактным поршневым двигателем, полученные в трехмерной постановке задачи:  
 1 — КПД  $\eta$ ; 2 — мощности  $N_T$ ; 3 — частоты вращения  $n$ ; 4 — давления  $p$ ; 5 — температуры  $T$ ;  
 6 — отношения окружной скорости к адиабатной  $u/c_{ад}$ ; 7 — степени реактивности  $\rho$

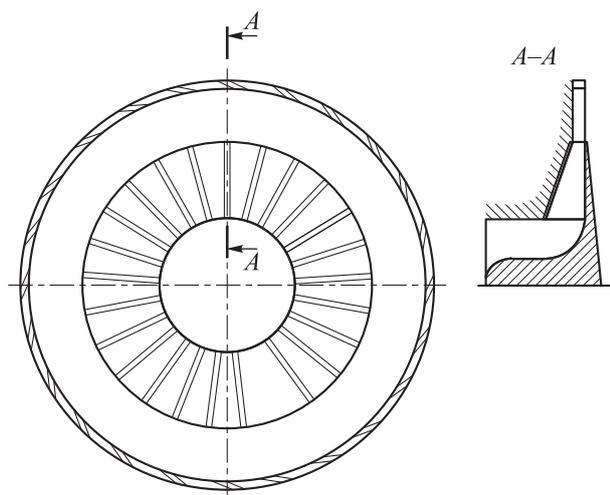


Рис. 7. Схема импульсной ЦСТ с расчетными геометрическими параметрами

в кинетическую энергию вращения турбинного колеса.

Для расчета импульсной турбины использованы параметры цикла (19 точек) четырехтактного поршневого двигателя ДН 20,7 [15]. В качестве входных данных получены зависимости КПД, мощности  $N_T$ , отношения окружной скорости к адиабатной и степени реактивности от продолжительности цикла [9, 10], т. е. от угла поворота коленчатого вала двигателя  $\varphi$  (рис. 6).

Удобство такого подхода можно объяснить возможностью рассчитать много режимов за короткое время, благодаря тому, что в программе использована упрощенная система уравнений, а трение о поверхности диска турбины и сжимаемость учтены известными формулами.

Полученные параметры импульсной ЦСТ адаптированы под следующую геометрию РК и СА: турбина — без спрямляющего аппарата на выходе, радиальная протяженность лопаток — 66,7 мм, диаметр РК — 250 мм, высота лопаток на входе — 10 мм, наружный диаметр СА —

300 мм; внутренний диаметр СА — 286,66 мм. Схема импульсной ЦСТ с расчетными геометрическими параметрами приведена на рис. 7.

## Выводы

1. Проведено исследование влияния количества лопаток РК и СА на КПД турбины, показавшее, что для СА их оптимальное значение составляет 24 шт., а для РК — 25 шт.

2. Исследовано влияние отношения высоты лопаток на выходе к высоте лопаток на входе РК на КПД турбины, позволившее установить, что наилучшим является отношение  $\chi = 3,5$ , большее значение  $\chi$  не принесет существенного увеличения КПД такой ЦСТ.

3. Выполнено исследование влияния изогнутости лопаток РК на КПД турбины, показавшее, что оптимальной является изогнутость краев лопаток по направлению вращения. При использовании таких лопаток КПД турбины увеличивается (на 0,0056) по сравнению с КПД турбины, имеющей РК с прямыми лопатками.

4. Проведен расчет параметров импульсной ЦСТ, работающей на ОГ четырехтактного поршневого двигателя, в трехмерной постановке. Полученные параметры ЦСТ адаптированы под следующую геометрию РК и СА: турбина — без спрямляющего аппарата на выходе; радиальная протяженность лопаток — 66,7 мм; диаметр РК — 250 мм, высота лопаток на входе — 10 мм; наружный диаметр СА — 300 мм; внутренний диаметр СА — 286,66 мм.

5. Установлено, что эффективный КПД импульсной ЦСТ, равный 0,733, выше среднего КПД (0,5...0,6) турбин такого типа.

6. Дальнейшая работа связана с исследованием влияния на КПД турбины параметров профилей СА, длины лопаток и их расположения по радиусу и аэродинамических профилей, примененных в качестве лопаток в рабочем РК.

## Литература

- [1] Boyce Meherwan P. *Gas Turbine Engineering Handbook*. Houston, Butterworth-Heinemann, 2001. 799 p.
- [2] Самарский А.А. *Введение в численные методы*. Санкт-Петербург, Изд-во «Лань», 2005. 271 с.
- [3] Черняк В.Г., Суевин П.Е. *Механика сплошных сред*. Москва, Физматлит, 2006. 352 с.
- [4] Cohen H., Rogers G.F.C., Saravanamuttoo H.I.H. *Gas Turbine Theory*. Longman, Harlow, T.J. Press, 1996. 442 p.
- [5] Шерстюк А.Н., Зарянкин А.Е. *Радиально-осевые турбины малой мощности*. Москва, Машиностроение, 1976. 207 с.

- [6] Takao M., Setoguchi T. Air turbines for wave energy conversion. *International Journal of Rotating Machinery*, 2012, vol. 12, no. 717398, doi: 10.1155/2012/717398
- [7] Довгялло А.И., Шиманов А.А. Возможность использования импульсной двунаправленной турбины в термоакустическом двигателе. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического государственного университета*, 2015, т. 14, № 1, с. 132–138.
- [8] Takao M., Fujioka Y., Homma H., Kim T.-W., Setoguchi T. Experimental Study of a Radial Turbine Using Pitch-Controlled Guide Vanes for Wave Power Conversion. *International Journal of Rotating Machinery*, 2006, vol. 2006, no. 17379, doi: 10.1155/IJRM/2006/17379
- [9] Моторин А.В., Распопов И.В., Фурсов И.Д. *Паровые турбины*. Барнаул, АлтГТУ, 2004. 127 с.
- [10] Костюк А.Г., Фролов В.В., Булкин А.Е., Трухний А.Д. *Паровые и газовые турбины для электростанций*. Москва, МЭИ, 2016. 557 с.
- [11] Li P.-Y., Gu C.-W., Song Y. A new optimization method for centrifugal compressors based on 1D calculations and analyses. *Energies*, 2015, vol. 8(5), pp. 4317–4334, doi: 10.3390/en8054317
- [12] Митрохин В.Т. *Выбор параметров и расчет радиальной центробежной турбины на стационарных и переходных режимах*. Москва, Машиностроение, 1974. 228 с.
- [13] Rangwala A.S. *Turbo-machinery dynamics*. McGraw-Hill Companies, 2005. 535 p.
- [14] Tarnawski P., Ostapski W. Pulse powered turbine engine concept — numerical analysis of influence of different valve timing concepts on thermodynamic performance. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 2018, vol. 66, no. 3, pp. 373–382, doi: 10.24425/123444
- [15] Орлин А.С., Круглов М.Г., ред. *Теория поршневых и комбинированных двигателей*. Москва, Машиностроение, 1983. 372 с.

## References

- [1] Boyce Meherwan P. *Gas Turbine Engineering Handbook*. Houston, Butterworth-Heinemann, 2001. 799 p.
- [2] Samarskiy A.A. *Vvedeniye v chislennyye metody* [Introduction to Numerical Methods]. Sankt-Petersburg, Lan' publ., 2005. 271 p.
- [3] Chernyak V.G., Suyetin P.E. *Mekhanika sploshnykh sred* [Continuum mechanics]. Moscow, Fizmatlit publ., 2006. 352 p.
- [4] Cohen H., Rogers G.F.C., Saravanamuttoo H.I.H. *Gas Turbine Theory*. Longman, Harlow, T.J. Press, 1996. 442 p.
- [5] Sherstyuk A.N., Zaryankin A.E. *Radial'no-osevyye turbiny maloy moshchnosti* [Low Power Radial-Axial Turbines]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1976. 207 p.
- [6] Takao M., Setoguchi T. Air turbines for wave energy conversion. *International Journal of Rotating Machinery*, 2012, vol. 12, no. 717398, doi: 10.1155/2012/717398
- [7] Dovgyallo A.I., Shimanov A.A. Possibility of using a bi-directional impulse turbine in a thermo-acoustic engine. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2015, vol. 14, no. 1, pp. 132–138 (in Russ.).
- [8] Takao M., Fujioka Y., Homma H., Kim T.-W., Setoguchi T. Experimental Study of a Radial Turbine Using Pitch -Controlled Guide Vanes for Wave Power Conversion. *International Journal of Rotating Machinery*, 2006, vol. 2006, no. 17379, doi: 10.1155/IJRM/2006/17379
- [9] Motorin A.V., Raspopov I.V., Fursov I.D. *Parovyye turbiny* [Steam turbines]. Barnaul, AltSTU publ., 2004. 127 p.
- [10] Kostyuk A.G., Frolov V.V., Bulkin A.E., Trukhniy A.D. *Parovyye i gazovyye turbiny dlya elektrostantsiy* [Steam and gas turbines for power plants]. Moscow, MPEI publ., 2016. 557 p.
- [11] Li P.-Y., Gu C.-W., Song Y. A new optimization method for centrifugal compressors based on 1D calculations and analyses. *Energies*, 2015, vol. 8(5), pp. 4317–4334, doi: 10.3390/en8054317
- [12] Mitrokhin V.T. *Vybor parametrov i raschet radial'noy tsestrostremitel'noy turbiny na statsionarnykh i perekhodnykh rezhimakh* [Parameter selection and calculation of a centrifugal radial turbine in stationary and transient conditions]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1974. 228 p.
- [13] Rangwala A.S. *Turbo-machinery dynamics*. McGraw-Hill Companies, 2005. 535 p.

- [14] Tarnawski P., Ostapski W. Pulse powered turbine engine concept — numerical analysis of influence of different valve timing concepts on thermodynamic performance. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 2018, vol. 66, no. 3, pp. 373–382, doi: 10.24425/123444
- [15] *Teoriya porshnevyykh i kombinirovannykh dvigateley* [Theory of piston and combined engines]. Ed. Orlin A.S., Kruglov M.G. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1983. 372 p.

Статья поступила в редакцию 02.03.2020

## Информация об авторе

**РУСАКОВ Алексей Николаевич** — ведущий инженер-конструктор КО. ПАО «КАДВИ» (248021, Калуга, Российская Федерация, ул. Московская, д. 247, e-mail: anrusakov@bk.ru).

## Information about the author

**RUSAKOV Aleksey Nikolaevich** — Leading Design Engineer. PAO KADVI (248021, Kaluga, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 247, e-mail: anrusakov@bk.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Русаков А.Н. Расчетное исследование газодинамических параметров радиально-осевых турбин и их совместной работы с поршневыми двигателями. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 8, с. 44–50, doi: 10.18698/0536-1044-2020-8-44-50

### Please cite this article in English as:

Rusakov A.N. A Computational Study of Gas-Dynamic Parameters of Radial-Axial Turbines and Their Joint Operation with Piston Engines. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 8, pp. 44–50, doi: 10.18698/0536-1044-2020-8-44-50



## В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие под редакцией В.А. Сорокина, Д.А. Ягодникова

### «Технология производства ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе»

Изложены основы технологии изготовления ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе (РПДТ). Приведена классификация характеристик режимов работы отдельных агрегатов и РПДТ в целом, а также действующих на них силовых и тепловых нагрузок, обуславливающих выбор функциональных конструкционных материалов. Представлены данные о физико-механических и теплофизических свойствах металлических и композиционных конструкционных материалов, используемых при изготовлении элементов конструкции РПДТ. Рассмотрены основные технологические процессы и операции формообразования деталей, в том числе инновационные, и показаны примеры внедрения в конструирование и технологию изготовления РПДТ систем автоматизированного проектирования.

В учебном пособии использованы материалы научно-исследовательских работ, выполняемых в МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАИ, ИПХФ РАН, а также данные зарубежных научных периодических изданий.

Для студентов высших учебных заведений, а также для инженеров, работающих в области ракетно-космической техники.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru