

УДК 621.515

doi: 10.18698/0536-1044-2022-7-82-89

Профилирование рабочего колеса центробежного компрессора в меридиональной плоскости на основе расчета траекторий движения газа в силовом поле

Д.А. Калашников^{1,2}, Ю.А. Борисов^{1,2}, А.В. Чернышев²

¹ ФГБУН «Объединенный институт высоких температур РАН»

² МГТУ им. Н.Э. Баумана

Profiling a Centrifugal Compressor Impeller in the Meridional Plane Based on Gas Trajectories Calculation in a Force Field

D.A. Kalashnikov^{1,2}, Yu.A. Borisov^{1,2}, A.V. Chernyshev²

¹ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences

² Bauman Moscow State Technical University

Описаны подходы к профилированию формы проточных частей центробежных компрессорных ступеней в меридиональной плоскости. Отмечены проблемы, возникающие при профилировании таких изделий. Предложен подход к профилированию рабочего колеса в меридиональной плоскости, основанный на расчете траекторий движения элементарной массы газа в силовом поле. В качестве критерия, обеспечивающего бездефектный характер течения газа, выбран закон линейного изменения газодинамических параметров по длине проточной части.

Ключевые слова: центробежный компрессор, меридиональная плоскость, профилирование формы проточной части, рабочее колесо, газодинамические параметры

The article describes current approaches to profiling the shape of the flow paths of centrifugal compressor stages in the meridional plane. The problems that arise when profiling such products are identified. An approach to the profiling the impeller in the meridional plane is proposed, based on the calculation of the trajectories of the movement of an elementary mass of gas in a force field. As a criterion ensuring the defect-free nature of the gas flow, the law of linear change in gas-dynamic parameters along the length of the flow path is selected.

Keywords: centrifugal compressor, meridional plane, flow path profiling, impeller, gas-dynamic parameters

В России на привод промышленных компрессоров, вентиляторов и насосов приходится около 20 % потребления всей вырабатываемой электроэнергии [1]. Значительную долю этих машин составляют центробежные компрессорные ступени. Следовательно, повышение газодинамической эффективности проточных частей таких машин даже на несколько процентов

даст ощутимый экономический эффект в рамках нашей страны.

В качестве объекта исследования выбрано полуоткрытое центробежное рабочее колесо (РК) с осевым входом. Этот элемент имеет наиболее сложную пространственную форму, поэтому совершенствование методов ее профилирования даст наибольшее приращение эф-

фективности центробежной компрессорной ступени. Задачей профилирования является нахождение конкретной трехмерной формы проточной части РК, обладающей высокой степенью газодинамического совершенства.

Сложное трехмерное движение газа представляется как совокупность проекций траекторий на меридиональную и радиальную плоскости. Тогда профилирование РК можно разбить на две задачи в двумерной постановке: определение координат точек лопатки РК по длине и ширине проточной части в меридиональной плоскости и нахождение координат этих точек в радиальной плоскости.

Исследованы газодинамические процессы в проточной части РК центробежной компрессорной ступени при профилировании формы РК в меридиональной плоскости. Меридиональная плоскость РК получена сечением его проточной части плоскостью, образованной осевой и радиальной линиями координат.

Существует ряд подходов к определению формы проточной части РК центробежного компрессора в меридиональной плоскости [2], к которым относятся методы кривизны линий тока и использования функции тока [3, 4]. Метод кривизны линий тока подразумевает нахождение ряда точек путем совместного решения уравнения радиального равновесия и неразрывности в меридиональной плоскости [5]. Метод использования функции тока отсылает к понятию комплексного потенциала классической газовой динамики [6, 7]. Комплексный потенциал служит инструментом описания течения газа в определенном канале.

К общим недостаткам этих методов относятся сложность решения систем дифференциальных уравнений в частных производных, зависимость от корректности задания первого приближения формы лопаток в радиальной плоскости, а также использование в расчете некоторых средних характеристических значений плотности и температуры газа на протяжении всей линии тока, что является довольно грубым допущением.

Цель статьи — разработка более совершенного и удобного в применении подхода к профилированию в меридиональной плоскости проточной части РК центробежного компрессора.

Профилирование РК в меридиональной плоскости. В результате одномерного расчета с использованием начальных данных опреде-

лены значения газодинамических и геометрических параметров центробежной компрессорной ступени в контрольных сечениях. Такими параметрами являлись: D_1 и D_2 — входной и выходной диаметр РК, м; $D_{вт}$ — диаметр втулки РК, м; b_1 и b_2 — высота лопатки на входе в РК и на выходе из него, м; ρ_1 и ρ_2 — плотность газа на входе в РК и на выходе из него, кг/м³; T_1 и T_2 — температура газа на входе в РК и на выходе из него, К; p_1 и p_2 — давление газа на входе в РК и на выходе из него, Па; c_1 и c_2 — абсолютная скорость газа на входе в РК и на выходе из него, м/с; n — частота вращения РК, мин⁻¹; u_2 и w_2 — окружная и относительная скорость на выходе из РК, м/с; β_2 — угол относительной скорости на выходе из РК, рад; z_l — число лопаток РК; δ_l — толщина лопатки РК, м.

Приняты следующие основные допущения: пренебрежение в рамках двумерного расчета вязкостью газа и аппроксимация сложного характера движения частицы газа в турбулентном течении движением элементарной массы газа по траектории в силовом поле. Действительная картина течения вязкого газа будет определена на этапе его трехмерного расчета с помощью одного из комплексов вычислительной газовой механики.

В РК центробежного компрессора на элементарную массу газа m действуют (рис. 1) [8]:

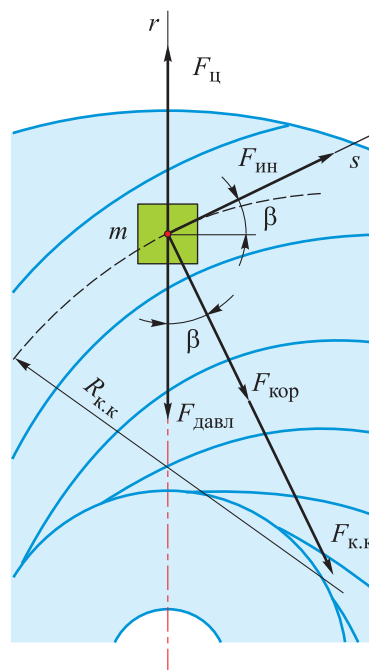


Рис. 1. Схема сил, действующих на элементарную массу газа в РК центробежного компрессора

• центробежная сила при вращении РК с окружной скоростью ω

$$F_{ц} = m\omega^2 r;$$

• инерционная сила ускорения или замедления потока в направлении движения

$$F_{ин} = w \frac{\delta w}{\delta s} m;$$

• сила Кориолиса

$$F_{кор} = 2\omega w m;$$

• центростремительная сила при движении в канале по криволинейной траектории

$$F_{к.к} = \frac{w^2}{R_{к.к}} m;$$

• сила сопротивления движению при перемещении массы из области с давлением p_1 в область с давлением p_2

$$F_{давл2} = (p_2 - p_1) \sqrt[3]{\frac{\bar{m}^2}{\rho_2} \frac{r}{R_2}},$$

где r — радиальная координата точки; w и δw — относительная скорость и ее изменение вдоль выбранного направления; δs — координата вдоль линии тока; \bar{m} — масса газа, проходящая через контрольное сечение в единицу времени; R_2 — выходной радиус РК.

Следовательно, в радиальном направлении суммарная сила имеет вид

$$F_{\Sigma r} = F_{ц} + F_{ин} \sin \beta - (F_{кор} + F_{к.к}) \cos \beta - F_{давл2},$$

где β — угол относительного потока по длине проточной части.

На этом этапе расчета неизвестна форма лопаток в радиальной плоскости, а значит, нельзя определить суммарную силу для каждого радиуса РК. Однако, исходя из данных одномерного расчета, можно оценить суммарную силу на выходе из РК:

$$F_{\Sigma r} = F_{цr_2} - F_{корr_2} \cos \beta_2 - F_{давл2}$$

где $F_{цr_2}$ и $F_{корr_2}$ — центробежная сила и сила Кориолиса на выходе из РК.

Принято, что $F_{ин} \sin \beta - F_{к.к} \cos \beta \approx 0$, так как по модулю силы $F_{ин}$ и $F_{к.к}$ значительно меньше $F_{цr_2}$, $F_{корr_2}$, $F_{давл2}$. Кроме того, силы $F_{ин}$ и $F_{к.к}$ противоположно направлены, т. е. суммарно компенсируют друг друга. Также абсолютная скорость на входе в РК c_1 принята одинаковой по всей ширине лопатки b_1 и имеющей только осевое направление.

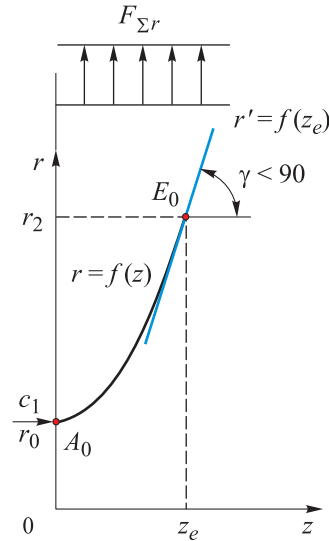


Рис. 2. Схема постановки задачи о нахождении траектории элементарной массы газа в силовом поле в меридиональной плоскости

На основании принятых положений сформулирована задача о нахождении траектории элементарной массы газа в силовом поле $F_{\Sigma r}$ при начальной абсолютной скорости газа на входе в РК c_1 (рис. 2). Точки A_0 и E_0 характеризуют граничные условия этой расчетной схемы.

Ускорение элементарной массы в поле действия сил в радиальной плоскости a_r и радиальная координата r определяются выражениями

$$a_r = \frac{F_{\Sigma r}}{m};$$

$$r = r_0 + \frac{a_r z^2}{2c_1^2},$$

где z — осевая координата; r_0 — начальный радиус траектории

При $r_0 = r_{вт}$ ($r_{вт}$ — радиус втулки РК) траектория элементарной массы газа будет характеризовать форму основного диска РК в первом приближении. Это значит, что на уровне $r = r_2$ координата z_e будет соответствовать длине проточной части РК в меридиональной плоскости:

$$z_e = \sqrt{\frac{2(r_2 - r_0)c_1^2}{a_r}}.$$

В выходном сечении РК центробежного компрессора скорость газового потока c_2 не должна иметь осевой составляющей. Это связано с необходимостью уменьшения потерь энергии в диффузоре, вызванных вторичными течениями газа в меридиональной плоскости.

Следовательно, касательная к кривой r'_{E_0} , характеризующей траекторию элементарной массы газа в точке E_0 с координатами (z_e, r_2) должна быть вертикальной ($\gamma = 90^\circ$):

$$r'_{E_0} = \frac{a_r z_e}{c_1^2};$$

$$\gamma = \arctg r'_{E_0}.$$

При близости касательной в точке E_0 к вертикальному положению ($89^\circ < \gamma \leq 90^\circ$) за выражение, описывающее форму кривой основного диска в меридиональной плоскости, можно принять уравнение траектории элементарной массы газа. Однако зачастую касательная не вертикальна, и кривую траектории элементарной массы газа необходимо деформировать или заменить на другую, удовлетворяющую условию касательной.

Допущение о действии на элементарную массу газа постоянной радиальной силы, определенной на основе значений на выходе из РК, позволило вычислить минимальную осевую длину проточной части. Так как в действительности радиальная сила растет от центробежной силы на высоте r_0 $F_{цв0}$ до $F_{\Sigma r}$ по некоторому закону, оптимальная осевая длина $z_{e\text{ опт}}$ будет несколько больше вычисленной ранее z_e .

Однако следует иметь в виду, что избыточное увеличение величины z_e может привести к отрыву газового потока от стенки основного диска в меридиональной плоскости. Следовательно, кажется допустимой замена кривой траектории элементарной массы газа на неко-

торую другую кривую, имеющую увеличенную кривизну, а следовательно, и вертикальную касательную в точке E_0 . Наиболее подходящим вариантом замены (рис. 3) является сектор эллипса с центром в точке $(0, r_2)$ и фокусами в точках $(0, r_0)$ и (z_e, r_2) .

В этом случае уравнение, описывающее форму основного диска РК в меридиональной плоскости, запишется как

$$\frac{(r - r_2)^2}{(r_2 - r_0)^2} + \frac{z^2}{z_e^2} = 1 \rightarrow r = r_2 - \sqrt{(r_2 - r_0)^2 \left(1 - \frac{z^2}{z_e^2}\right)};$$

$$0 \leq r \leq r_2; \quad 0 \leq z \leq z_e.$$

Чтобы оперировать длиной проточной части РК, необходимо вычислить длину кривой основного диска. Классическая формула для нахождения длины кривой имеет вид [9]

$$L = \int_0^{z_e} \sqrt{1 + [r'(z)]^2} dz.$$

Однако при применении этой формулы могут возникнуть проблемы с определением первообразной функции, полученной в случае уравнения сектора эллипса. Поэтому задачу предлагается решить численно методами аналитической геометрии.

Для нахождения длины кривой основного диска необходимо разбить осевую длину z_e на k равных отрезков. Значение k можно выбрать сколь угодно большим, но опыт показывает, что $k = 1000$ достаточно, чтобы обеспечить расчету удовлетворительную точность. Определяют $\Delta z = z_e/k$. При подстановке набора $0 + j\Delta z$, $j = 1, \dots, k$ в уравнение кривой основного диска вычисляют координаты k точек, лежащей на кривой основного диска.

Так как кривая основного диска содержит большое количество точек k , ее длину можно определить как сумму отрезков, соединяющих соседние точки между собой:

$$L = \sum_0^k l_k;$$

$$l_k = \sqrt{(z_k - z_{k-1})^2 + (r_k - r_{k-1})^2}.$$

Исходя из координат набора точек на кривой основного диска и ее длины, можно найти точки, разделяющие кривую на десять равных по длине участков (рис. 4). Для случая разбиения на десять участков по длине промежуточным точкам присвоены буквенные обозначения $K_0, L_0, M_0, N_0, O_0, P_0, R_0, S_0, T_0$.

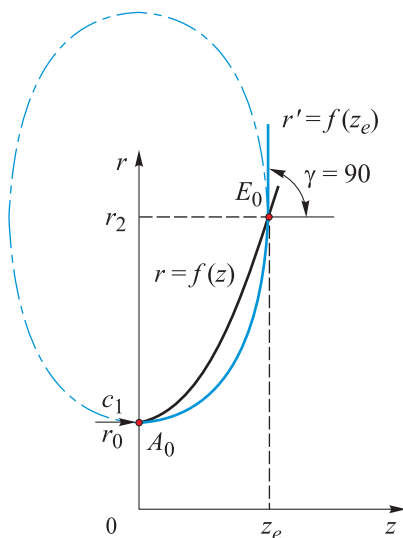


Рис. 3. Схема определения формы основного диска РК при замене кривой траектории элементарной массы газа

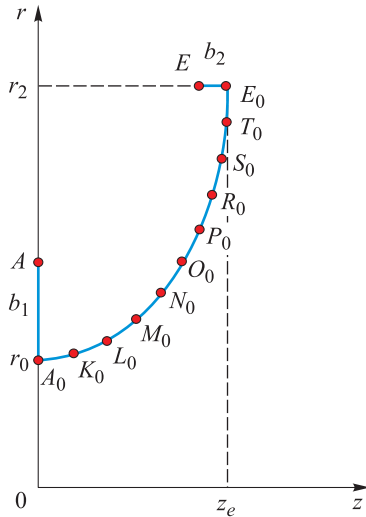


Рис. 4. Схема нахождения точек, разделяющих кривую основного диска на десять равных по длине участков

Следующим этапом расчета является нахождение координат точек и уравнения полинома, характеризующих периферическую кривую проточной части РК в меридиональной плоскости. Так как РК имеет осевой вход и радиальный выход газа, входные и выходные координаты периферической кривой определяются как $A_0(0, r_{вт} + b_1)$ и $E_0(z_e - b_2, r_2)$ соответственно.

Чтобы определить набор промежуточных точек периферической кривой, необходимо отложить от точек кривой основного диска отрезки, характеризующие ширину канала в данном сечении. Для корректности этой операции принято линейное изменение ширины канала от b_1 до b_2 по длине проточной части РК.

Также с учетом условия двумерного расчета, по которому параметры газа меняются только при переходе от одного сечения к другому, принято линейное изменение по длине проточной части плотности от ρ_1 до ρ_2 .

Так как ранее были определены точки основного диска, разделяющие его кривую на десять равных по длине участков, каждой из этих точек можно присвоить соответствующую ширину канала, изменяющуюся по формуле

$$b_n = b_1 - n \frac{b_1 - b_2}{10}, \quad n \in Z = 0, \dots, 10,$$

где n — номер точки по длине проточной части; Z — множество целых чисел.

Шириной канала считается отрезок, концы которого откладывают равные доли длины на кривой основного диска и на периферической кривой. Условия равных долей и закон измене-

ния ширины канала в совокупности с известными координатами точек кривой основного диска, начальной и конечной ширины лопатки в меридиональной плоскости позволяют составить систему из 28 уравнений.

В результате решения этой системы становятся известны координаты девяти промежуточных точек периферической кривой, а также углы наклона ширины канала относительно вертикальной оси ϵ (рис. 5):

$$\begin{cases} z_K = z_{K_0} - b_K \sin \epsilon_K; \\ r_K = r_{K_0} + b_K \cos \epsilon_K; \\ (z_K - z_A)^2 + (r_K - r_A)^2 = J^2; \\ \dots \\ z_T = z_{T_0} - b_T \sin \epsilon_T; \\ r_T = r_{T_0} + b_T \cos \epsilon_T; \\ (z_T - z_S)^2 + (r_T - r_S)^2 = J^2; \\ (z_E - z_T)^2 + (r_E - r_T)^2 = J^2, \end{cases}$$

где J — длина отрезка периферической кривой, откладываемая ширинами канала из корневой кривой; нижние индексы параметров соответствуют точкам периферической кривой.

Разбиение на десять участков по длине как кривой основного диска, так и периферической кривой J представляется оптимальным, так как в случае уменьшения числа точек длина отрезков J будет все сильнее отличаться от длины участка кривой. В случае увеличения числа точек система уравнений будет усложняться на три уравнения для каждой дополнительной точки.

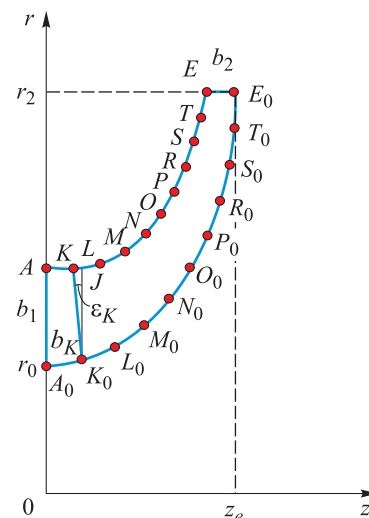


Рис. 5. Схема нахождения точек, характеризующих периферическую кривую РК в меридиональной плоскости

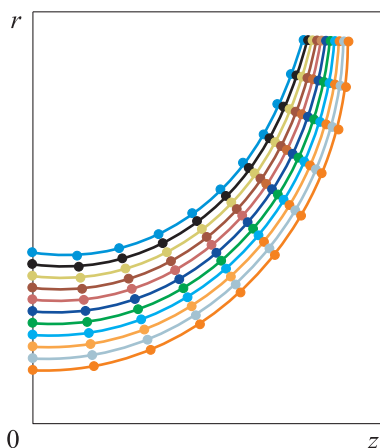


Рис. 6. Схема нахождения точек, характеризующих проточную часть РК по длине и ширине лопатки

Для получения уравнения, характеризующего форму периферической кривой, воспользуемся методом интерполяции Лагранжа с использованием набора найденных ранее точек [10]:

$$r(z) = r_1 l_1 + r_2 l_2 + \dots + r_n l_n;$$

$$l_1 = \frac{(z - z_2)(z - z_3) \dots (z - z_h)}{(z_1 - z_2)(z_1 - z_3) \dots (z_1 - z_h)};$$

$$\dots$$

$$l_n = \frac{(z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_{h-1})}{(z_h - z_1)(z_h - z_2) \dots (z_h - z_{h-1})},$$

где l_1, \dots, l_n — коэффициенты в формуле интерполяции Лагранжа.

При подстановке координат точек периферической кривой можно получить уравнение полинома h -й степени, проходящей через эти точки:

$$r = Az^h + Bz^{h-1} + Cz^{h-2} + \dots + G,$$

где A, B, C, \dots, G — действительные числа.

Далее требуется найти координаты точек по ширине лопатки для выделенных контрольных сечений, разбивающих проточную часть РК на равные по длине участки (рис. 6).

По ширине лопатки также достаточно десяти точек для каждого контрольного сечения. Координаты точек по ширине лопатки ($i \in Z = 0, \dots, 10$) определяются системой уравнений

$$\begin{cases} z_{Ki} = z_{K0} - \frac{i}{10} b_K \sin \epsilon_K; \\ r_{Ki} = r_{K0} + \frac{i}{10} b_K \cos \epsilon_K; \\ \dots \\ z_{Ti} = z_{T0} - \frac{i}{10} b_T \sin \epsilon_T; \\ r_{Ti} = r_{T0} + \frac{i}{10} b_T \cos \epsilon_T. \end{cases}$$

Эти координаты необходимы для дальнейшего профилирования формы лопаток в радиальной плоскости.

Выводы

1. Обоснованы возможность и необходимость совершенствования подходов к профилированию в меридиональной плоскости проточной части РК центробежного компрессора.
2. Предложен подход к профилированию в меридиональной плоскости проточной части РК центробежного компрессора, основанный на расчете траекторий движения элементарной массы газа в силовом поле.
3. Получены уравнения, характеризующие кривую основного диска РК.
4. Составлена система уравнений для определения набора координат точек, характеризующих периферическую кривую РК.
5. Описан метод интерполяции, позволяющий найти уравнение кривой, характеризующей периферическую кривую РК.
6. Получена система уравнений для определения массива координат точек по длине и ширине проточной части, необходимая для дальнейшего профилирования РК в радиальной плоскости.

Литература

[1] Хисамеев И.Г., Максимов В.А., Баткис Г.С. и др. *Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных компрессоров*. Казань, ФЭН, 2010. 671 с.
 [2] Виноградов Л.В. Меридиональное профилирование колеса центробежного компрессора. *Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования*, 2004, № 2, с. 35–39.
 [3] Кампти Н. *Аэродинамика компрессоров*. Москва, Мир, 2000. 688 с.
 [4] Крайко А.Н. *Теоретическая газовая динамика*. Москва, Торус Пресс, 2010. 440 с.

- [5] Denton J.D. The use of a distributed body force to simulate viscous effects in 3D flow calculations. *ASME Int. Gas Turbine Conf. and Exhibit.*, 1986, vol. V001T01A002, doi: <https://doi.org/10.1115/86-GT-144>
- [6] Степанов Г.Ю. *Гидродинамика решеток турбомашин*. Москва, Физматгиз, 1962. 512 с.
- [7] Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. Москва, Дрофа, 2003. 840 с.
- [8] Ден Г.Н. *Механика потока в центробежных компрессорах*. Ленинград, Машиностроение, 1973. 272 с.
- [9] Геворкян П. *Линейная алгебра и аналитическая геометрия*. Москва, Физматлит, 2014. 204 с.
- [10] Ахмадиев Ф.Г., Габбасов Ф.Г., Ермолаева Л.Б. и др. *Численные методы. Примеры и задачи*. Казань, Изд-во КГАСУ, 2017. 107 с.

References

- [1] Khisameev I.G., Maksimov V.A., Batkis G.S. et al. *Proektirovanie i ekspluatatsiya promyshlennykh tsentrobezhnykh kompressorov* [Design and exploitation of industrial centrifugal compressors]. Kazan', Fen Publ., 2010. 671 p. (In Russ.).
- [2] Vinogradov L.V. A meridian profiling of a sprocket of the centrifugal compressor. *Vestnik RUDN. Ser. Inzhenernye issledovaniya* [RUDN Journal of Engineering Research], 2004, no. 2, pp. 35–39. (In Russ.).
- [3] Cumpsty N.A. *Compressor aerodynamics*. Krieger, 2004. 552 p. (Russ. ed.: *Aerodinamika kompressorov*. Moscow, Mir Publ., 2000. 688 p.)
- [4] Krayko A.N. *Teoreticheskaya gazovaya dinamika* [Theoretical gas dynamics]. Moscow, Torus Press Publ., 2010. 440 p. (In Russ.).
- [5] Denton J.D. The use of a distributed body force to simulate viscous effects in 3D flow calculations. *ASME Int. Gas Turbine Conf. and Exhibit.*, 1986, vol. V001T01A002, doi: <https://doi.org/10.1115/86-GT-144>
- [6] Stepanov G.Yu. *Gidrodinamika reshetok turbomashin* [Hydrodynamics of turbomachine grids]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962. 512 p. (In Russ.).
- [7] Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid mechanics]. Moscow, Drofa Publ., 2003. 840 p. (In Russ.).
- [8] Den G.N. *Mekhanika potoka v tsentrobezhnykh kompressorakh* [Fluid mechanics in centrifugal compressors]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1973. 272 p. (In Russ.).
- [9] Gevorkyan P. *Lineynaya algebra i analiticheskaya geometriya* [Linear algebra and analytic geometry]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2018. 204 p. (In Russ.).
- [10] Akhmadiev F.G., Gabbasov F.G., Ermolaeva L.B. et al. *Chislennyye metody. Primery i zadachi* [Numerical methods. Examples and problems]. Kazan', Izd-vo KGASU Publ., 2017. 107 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 05.06.2022

Информация об авторах

КАЛАШНИКОВ Дмитрий Алексеевич — аспирант кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана; младший научный сотрудник лаборатории №10.1. ФГБУН «Объединенный институт высоких температур РАН» (125412, Москва, Российская Федерация, ул. Ижорская д. 13, стр. 2, e-mail: kalashnikovniten@mail.ru).

Information about the authors

KALASHNIKOV Dmitry Alekseevich — Postgraduate, Department of Vacuum and Compressor Equipment. Bauman Moscow State Technical University; Research Assistant, Laboratory No. 10.1, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (125412, Moscow, Russian Federation, Izhorskaya St., Bldg.13. Block 2, e-mail: kalashnikovniten@mail.ru).

БОРИСОВ Юрий Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана; старший научный сотрудник лаборатории №10.1. ФГБУН «Объединенный институт высоких температур РАН» (125412, Москва, Российская Федерация, ул. Ижорская д. 13, стр. 2, e-mail: boricovyu@gmail.com).

BORISOV Yury Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Vacuum and Compressor Equipment. Bauman Moscow State Technical University; Senior Researcher, Laboratory No. 10.1, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (125412, Moscow, Russian Federation, Izhorskaya St., Bldg.13. Block 2, e-mail: boricovyu@gmail.com).

ЧЕРНЫШЕВ Андрей Владимирович — доктор технических наук, заведующий кафедрой «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: av-chernyshev@yandex.ru).

CHERNYSHEV Andrey Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Head of the Department of Vacuum and Compressor Equipment. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block, 1 e-mail: av-chernyshev@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Калашников Д.А., Борисов Ю.А., Чернышев А.В. Профилирование рабочего колеса центробежного компрессора в меридиональной плоскости на основе расчета траекторий движения газа в силовом поле. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 7, с. 82–89, doi: 10.18698/0536-1044-2022-7-82-89

Please cite this article in English as:

Kalashnikov D.A., Borisov Yu.A., Chernyshev A.V. Profiling a Centrifugal Compressor Impeller in the Meridional Plane Based on Gas Trajectories Calculation in a Force Field. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 7, pp. 82–89, doi: 10.18698/0536-1044-2022-7-82-89



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию**

**«Строительная механика композитных
конструкций ракетно-космической техники.
Курс лекций»**

Авторы: Ан.А. Смердов, Ал.А. Смердов

Приведены основные положения теории оптимального проектирования конструкций, рассмотрены методы проектных расчетов композитных материалов и простейших элементов конструкций, а также несущих композитных оболочек различных конструктивных схем и размеростабильных композитных космических конструкций. Представлены алгоритмы расчета типовых композитных элементов конструкций, которые могут быть самостоятельно использованы студентами при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Для студентов старших курсов, обучающихся по специальности 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракетно-космических комплексов» Материал отдельных лекций может быть также использован при изучении смежных дисциплин, таких как «Проектные расчеты композитных конструкций ракетно-космической техники», «Строительная механика ракет» и «Строительная механика космических аппаратов».

По вопросам приобретения обращайтесь:

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