УДК 621.573

Алгоритм и примеры многопараметрической автоматизированной расчетной оптимизации компрессорных ступеней с осерадиальными рабочими колесами турбодетандерных агрегатов

А. М. ДАНИЛИШИН¹, канд. техн. наук **Ю. В. КОЖУХОВ²** danilishin am@mail.ru¹, kozhukhov yv@mail.ru²

Университет ИТМО

Исследование представляет алгоритм и результаты многопараметрической оптимизации высокорасходных моdельных ступеней центробежного компрессора. Представлено использование CAD параметризированной модели компрессорной ступени в процедуре автоматизированной расчетной оптимизации методом AMO — Adaptive Multiple-Objective в комплексе Ansys. Для прогнозирования эффективности компрессорной ступени на расчетном режиме используется вязкий трехмерный CFD расчет. В качестве целевой функции задачи оптимизации выбран КПД ступени по полным параметрам и ограничение по коэффициенту политропного напора по полным параметрам. С помощью алгоритма выполнено совершенствование модельных ступеней центробежного компрессора. В результате повышен КПД на 1,5–2,5%, и расширена зона энергоэффективной работы ступеней на 30–60%. Результате повышен КПД на показали, что расчетная оптимизация может успешно применяться при доводке проектируемой проточной части центробежного компрессора для получения наивысших показателей эффективности.

Ключевые слова: расчетная оптимизация, многопараметрическая оптимизация, турбодетандерный агрегат, компрессорная ступень, рабочее колесо.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 07.05.2022, одобрена после рецензирования 18.05.2022, принята к печати 27.05.2022 DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-27-34

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Данилишин А. М., Кожухов Ю. В. Алгоритм и примеры многопараметрической автоматизированной расчетной оптимизации компрессорных ступеней с осерадиальными рабочими колесами турбодетандерных агрегатов. // Вестник Международной академии холода. 2022. № 2. С. 27–34. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-27-34

Algorithm and the examples of multiparametric automated computational optimization for turboexpander compressor stage 3D impellers

A. M. DANILISHIN¹, Ph. D. Y. V. KOZHUKHOV²

¹danilishin_am@mail.ru, ²kozhukhov_yv@mail.ru

ITMO University

The study presents an algorithm and results of the multiparametric optimization for high-flow centrifugal compressor stages. We present the use of a CAD parameterized model of the compressor stage in the automated computational optimization procedure by the AMO — Adaptive Multiple-Objective method in the Ansys complex. To predict the compressor stage efficiency in the design mode, a viscous three-dimensional CFD calculation is used. As an objective function of the optimization problem, the stage total to total polytropic efficiency and the total to total polytropic head coefficient constraint are selected. The algorithm was used for the centrifugal compressor stages improvement. As a result, the efficiency was increased by 1.5-2.5%, and the stages energy — efficient operation zone was expanded by 30-60%. The results of the study showed that computational optimization can be successfully applied for the projected centrifugal compressor flow part fine-tuning to obtain the highest efficiency.

Keywords: computational optimization, multiparametric optimization, turbodetander unit, compressor stage, impeller.

Article info: Received 07/05/2023, approved after reviewing 18/05/2022, accepted 27/05/2022 DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-27-34 Article in Russian

For citation:

Danilishin A. M., Kozhukhov Y. V. Algorithm and the examples of multiparametric automated computational optimization for turboexpander compressor stage 3D impellers. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 2. p. 27–34. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-27-34

Введение

Современные подходы повышения качества проектирования невозможны без применения технологий цифрового моделирования и проектирования. Большинство технологий реализуются в CALS-технологиях, а именно конструкторские САПР (CAD-Computer Aided Design), технологические САПР (САМ-Computer Aided Manufacturing), автоматизированные системы инженерных расчетов (CAE — Computer Aided Engineering). Объединение суперкомпьютерных комплексов с параметрическим построением моделей и их расчетом в программах инженерного анализа позволяет подходить к решению многопараметрических и многокритериальных задач оптимизации. Это важно, в связи с увеличивающейся ролью цифровых двойников, используемых при проектировании новых изделий для проверки их свойств виртуальным способом. Это позволяет существенно сократить число натурных доводочных испытаний, а то и вовсе отказаться от них. Такой подход сокращает затраты времени на проведение опытно-конструкторских работ, а также уменьшает материальные затраты.

В данной работе рассматривается подход выполнения многокритериальной и многопараметрической оптимизации ступени центробежного компрессора с осерадиальным рабочим колесом. Подобные ступени широко используются в турбодетандерных агрегатах (ТДА) низкотемпературных установок комплексной подготовки газа, на станциях охлаждения газа в составе компрессорных станций, в малотоннажных установках производства сжиженного газа. Потребность в ТДА на добычных объектах ПАО «Газпром» до 2035 г. оценивается в 113 шт. [1]. Поставлена цель — провести многопараметрическую автоматизированную расчетную оптимизацию и оценить ее эффективность на примере оптимизации проточных частей модельных ступеней центробежного компрессора для получения более высокоэффективной аэродинамической формы, чем у базовой конструкции. Для выполнения цели поставлены задачи: выполнить параметризацию геометрической модели, настроить алгоритм проведения расчетной оптимизации, провести необходимые расчеты и проанализировать результаты оптимизации с точки зрения повышения эффективности и экономичной зоны работы.

Обращаясь к зарубежному опыту оптимизации можно выделить первые работы в области турбомашин [2, 3], в которых использована многокритериальная и многопараметрическая оптимизация с применением CFD. В исследовании [4] произведена оптимизация осерадиального рабочего колеса трансзвукового центробежного компрессора в два этапа: первый для профиля лопатки, второй для меридионального контура при помощи кривых Безье. В работах [5, 6] рассматривались две целевые функции: изоэнтропный КПД и отношение давление и четыре геометрических параметра, которые определяют меридиональный контур рабочего колеса. С помощью оптимизации повышена эффективность на 0,65% и отношение давлений на 0,86%. Оптимизация геометрических параметров диагонального компрессора проводилась в [7], был получен вариант геометрии лопаточных венцов диагональной ступени с большим на 2,5–3,0% уровнем КПД по сравнению с базовым вариантом. Оптимизация осерадиального рабочего колеса и других элементов проточной части также проводилась в работах [8]–[11].

Для всех работ характерно, что первичная геометрическая модель проточной части получена с помощью традиционных одномерных методик проектирования, для которой выполняется расчетная доводка геометрической формы с помощью решения задачи оптимизации. Этот подход получил название оптимизация формы (shape optimization). Основным принципом расчетной оптимизации в данном исследовании является объединение CAD-CAE и алгоритма оптимизации. Производится автоматизированные множественные CFD расчеты набора форм проточной части, которые анализируются специальным методом, который определяет новый набор форм, последовательно приближающий к достижению заданной целевой функции — максимальной эффективности — с учетом внесенных ограничений на изменение геометрических параметров элементов проточной части. Цикл продолжается до достижения целевой функции по значениям КПД или останавливается по истечению заданного числа циклов или принудительным остановом со стороны пользователя. Кроме того, в результате расчетов получается достаточно обширная база данных, объединяющая геометрические и газодинамические параметры. Такая база может быть и разработана специальным образом с помощью теории планировании эксперимента для исследования механизма возникновения и дифференциации потерь. С помощью баз данных характеристик могут создаваться модели пониженного порядка (ROM — reduced order model) в качестве «черного ящика» для моделирования пневмосетей и объектов нефтегазовой инфраструктуры [12],[13].

За объект расчетной оптимизации выбраны высоконапорные ступени центробежного компрессора, разработанные в СПбПУ [14]. Геометрические и газодинамические данные ступеней РК-61, РК-41, РК-21 представлены в работе [15] и сведены в табл. 1.

Методология проведения расчетной оптимизации

Описание параметрической модели проточной части двухзвенной ступени представлено в источнике [16], которая состоит осерадиального рабочего колеса и безлопаточного диффузора. Осерадиальное рабочее колесо имеет вращающийся направляющий аппарат (BHA) и радиальную часть (PPK). На рис. 1 представлена схема ступени для проведения расчетной оптимизации. С помощью параметрической модели были построены идентичные

Таблица 1

Основные геометрические и газодинамические параметры объектов расчетной оптимизации

Table 1

№	Шифр	Диаметр рабочего колеса D ₂ , м.	Число лопаток z, шт.	Расчетный условный коэффици- ент расхода Ф _р	Условное число Маха М _и	Расчетный коэффициент теоретического напора ψ _{т. р.}	Угол выхода лопаток β _{n2} , град
1	РК-61	0,442	24	0,064	0,78	0,74	59.5
2	РК-41	0,410	24	0,080	0,78	0,74	63
3	РК-21	0,380	24	0,100	0,78	0,74	65

Main geometric and gas-dynamic parameters for the objects of computational optimization

натурным виртуальные модельные ступени PK-61, PK-41 и PK-21 в программном Ansys design modeler.

Так как оптимизируется существующие модели ступени, то используются поправки к геометрическим параметрам меридионального сечения: k_1, k_2, k_3, k_z , где:

*k*₁*R*_{пг} — поправка к радиусу перегиба в сечении Т-Т; *k*₂*l*_{рад} — поправка к осевой протяженности радиальной части РРК;

*k*₃*R*_{вт} — поправка к радиусу сопряжения для поверхности втулки;

k_zL_z — поправка к осевой протяженности рабочего колеса.

Варьируемые при оптимизации параметры ОРК выбраны в следующем диапазоне значений: z = (20 - 25), $k_1 = (0, 8-1, 0), k_2 = (0, 85-1, 0), k_3 = (1, 0-1, 3), k_z = (0, 85-1, 0).$ Варьируемые при оптимизации параметры БЛД выбраны в следующем диапазоне значений: $b_3/b_2 = (0, 8-1, 6)$, $b_4/b_2 = (0,8-1,6), R_3/R_2 = (1,05-1,25).$ Использовано 7 геометрических параметров, обеспечивающих изменение меридионального контура ступени и 1 параметр, отвечающий за изменение количества лопаток рабочего колеса. Высота и углы лопаток рабочего колеса на входе и выходе остаются неизменными, так как модельные ступени обеспечивают необходимый напор и производительность. Поэтому в качестве целевой функции оптимизации выбраны: максимизация коэффициента политропного КПД ступени по полным параметрам $\eta^*_n \rightarrow max$ и неизменное значение коэффициента политропного напора по полным параметрам ψ^*_{π} .

В целом процедуру расчетной оптимизации можно изобразить в диаграмме, показанной на рис. 2. Строится первичная CAD модель проточной части в Ansys Design modeler по геометрическим параметрам, внедренным в параметрическую модель. Затем производится генерация расчетной сетки для проточной части, которая используется для составления численной модели в Ansys CFX v18.0. Методами вычислительной газодинамики определяются газодинамические параметры в расчетной точке. Для проведения многокритериальной и многопараметрической оптимизации могут быть использованы встроенные методы Ansys DesignXplorer: AMO — Adaptive Multiple-Objective — адаптивный многокритериальный метод гибридной оптимизации, основанный на методе NSGA-II и использующий поверхность отклика, определенную по процедуре кригинга; MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm — многокритериальный эволюционный алгоритм). Также для оптимизации может быть использован внешний модуль оптимизации, например IOSO,



Рис. 1. Схема двухзвенной ступени центробежного компрессора для расчетной оптимизации

Fig. 1. Centrifugal compressor two-section stage for computational optimization



Puc. 2. Процедура расчетной оптимизации Fig. 2. Computational optimization procedure

OptiSLang и др. В нашем случае использован встроенный метод оптимизации Adaptive Multiple-Objective (AMO). Этот модуль решает поставленную задачу оптимизации, т. е. выполняет построение поверхности отклика целевой функции от варьируемых параметров и определяет возможный локальный или глобальный экстремум функции, осуществляет подготовку новых параметров. Таким образом, расчетный цикл повторяется до выполнения поставленной цели оптимизации.

Оптимизация производится для расчетного режима по заданной производительности ступени. Для CFD моделирования на входе задается полное давление и температура. На выходе массовый расход ступени. Модель турбулентности — SST (Shear stress transport) [17]. Для сходимости данной численной задачи требуется порядка 300 итераций. Размер расчетной сетки порядка 1 млн элементов. Значение безразмерной пристеночной координаты y⁺ < 2.

Политропный КПД по полным параметрам определен как:

$$\eta_n^* = \frac{h_{\Pi} + h_{\Pi}}{h_i}, \qquad (1)$$

где h_{Π} — политропный напор; $h_{Д}$ — динамический напор; h_{i} — внутренний напор.

Коэффициент политропного напора по полным параметрам рассчитывается по формуле:

$$\psi_{\Pi}^{*} = (h_{\Pi} + h_{\Pi}) / u_{2}^{2},$$
(2)

где u_2 — окружная скорость вращения на наружном диаметре рабочего колеса.

Коэффициент зоны экономичной работы определяется по формуле:

$$K_{3.3.p.} = \frac{\Phi_{max}(0,95 \cdot \eta_{1.4\,p}^*) - \Phi_p}{\Phi_p},$$
(3)

где Φ_{max} — условный коэффициент расхода на режиме соответствующем (0,95 · $\eta_{\text{rfd}\,p}$) в сторону повышенной производительности, $\eta_{\text{rfd}\,p}$ — политропный коэффициент полезного действия по полным параметрам по сечению на выходе из диффузора в сечении 4–4 на расчетном режиме.

Формула (3), показывает, как меняется крутизна правой ветви характеристики и ее близость к расчетной производительности. Чем больше значение, тем более пологая характеристика ступени. Изменение коэффициента зоны экономичной работы относительно базового варианта обозначим как:

$$\Delta_{K_{3,3,p.}} = \frac{K_{3,3,p.}^{\text{OIIT}} - K_{3,3,p.}^{\text{fd}3}}{K_{3,3,p.}^{\text{fd}3}} \cdot 100\%.$$
(4)

Результаты расчетной оптимизации

На рис. 3 показано изменение политропного КПД по полным параметрам в сечении 4–4 в процессе расчетной оптимизации ступеней РК-61, РК-41, РК-21. Первоначально производится распределение вариантов для заполнения диапазонов варьируемых параметров (опция optimal space filling — оптимальное заполнение простран-

ства). На это уходит 250 начальных CFD расчетов с различными вариантами формы проточной части. Затем после обработки полученных результатов формируется еще 250 дополнительных CFD расчетов с различными вариантами формы проточной части. Результаты вязкого расчета первоначальных 500 вариантов используются для построения поверхности отклика, по которой определяется наилучшее направление оптимизации. С помощью поверхности отклика выполняется быстрый расчет 1000 виртуальных ступеней с целью определения наиболее перспективных вариантов форм проточной части для окончательной серии CFD-расчетов. Далее, по выбранному направлению окончательно выполняется серия CFD расчетов, заканчивающаяся достижением оптимальных вариантов. Этот заключительный этап может содержать порядка 250 вариантов исполнения проточной части.

Для каждой ступени выбирается оптимальный вариант из множества Парето (множество равнооптимальных вариантов, но различных по варьируемым параметрам). На основании опыта пользователя или технологических ограничений выбирается вариант проточной части, который рассчитывается отдельно для получения окончательных газодинамических характеристик, представленных на рис. 5, 6, 7. В табл. 2 сведены значения варьируемых параметров, полученных в результате расчетной оптимизации ступеней РК-61, 42, 21. На рис. 4 представлен внешний вид базовых и оптимизированных рабочих колес ступеней РК-61, РК-41, РК-21.

Оценивая изменение формы меридионального контура относительного базового варианта, можно отметить следующее:

1. Уменьшается радиус перегиба на 14–6%. Отмечается влияние расчетного условного коэффициента расхода Φ_p , с увеличением которого требуется меньшее изменение.

2. Уменьшается осевая протяженность радиальной части рабочего колеса в пределах 7,5%. Аналогично п. 1 требуется меньшее изменение с ростом Φ_p.

3. Увеличивается радиус сопряжения для поверхности втулки на 30% для всех рабочих колес.

4. Уменьшается осевая протяженность на 5–12,5% с увеличением Φ_p .

5. Уменьшается относительная ширина безлопаточного диффузора на 15–20%.

Результаты моделирования базового варианта валидируются путем сравнения с экспериментальными данными. Неопределенность моделирования составляет не более 2% для η_{Π}^* и не более 5% для ψ_{Π}^* в зоне экономичной работы (от штриховой зеленой до штриховой красной линий на рис. 5). Предположим, что неопределенность моделирования для базовой и оптимизированной проточной части ступени будет практически одинаковой относительно эксперимента. Тогда будем считать, что, сравнивая газодинамические характеристики базовой и оптимизированной проточной части ступени, будет определяться повышение эффективности. Конечно, желательно окончательный вариант оптимизированной проточной части ступени проверить экспериментально.

В результате оптимизации двухзвенной ступени РК-61 центробежного компрессора относительно базового варианта была существенно расширена зона эконо-







 Рис. 4. Базовое _____ и оптимизированное _____ рабочее колесо ступеней: а — PK-61; б — PK-41; в — PK-21

 Fig. 4. Base _____ and optimized _____ impeller of the stages: a — RK-61; б — RK-41; в — RK-21

Таблица 2

Значения варьируемых параметров, полученных в результате расчетной оптимизации

Table 2

The values of the variable parameters obtained after computational optimization

Параметр	Базовый	РК-61	РК-41	РК-21
Z	24	20	22	24
k_1	1,0	0,86	0,90	0,94
k ₂	1,0	0,925	0,95	1,0
k ₃	1,0	1,3	1,3	1,3
k _z	1,0	0,95	0,875	0,875
b_{3}/b_{2}	1,0	0,917	0,806	0,802
b_4/b_2	1,0	0,848	0,817	0,862
D_{3}/D_{2}	1,0	1,065	1,129	1,095



Puc. 5. Газодинамические характеристики базового и оптимизированного варианта ступени PK-61 Fig. 5. Gas-dynamic characteristics for the base and optimized variants of RK-61 stage



Puc. 6. Газодинамические характеристики базового и оптимизированного варианта ступени PK-41 Fig. 6. Gas-dynamic characteristics for the base and optimized variants of RK-41 stage

мичной работы компрессора на $\Delta_{K_{3,3,p,}} = 62\%, K_{3,3,p}$ уве-

личился с 0,25 до 0,40, увеличен η_{Π}^* на 1,0% на расчетном режиме Φ_p =0,064.

В результате оптимизации двухзвенной ступени РК-41 центробежного компрессора относительно базового варианта была существенно расширена зона экономической работы компрессора на $\Delta_{K_{3.3,p}} = 31\%$, $K_{3.3,p}$ увеличился с 0,26 до 0,34, увеличен η_{Π} на ~2,3% на расчетном режиме Φ_p =0,08. В результате оптимизации двухзвенной ступени РК-21 центробежного компрессора относительно базового варианта была существенно расширена зона экономической работы компрессора на $\Delta_{K_{3,3,p}} = 41\%, K_{3.3,p}$ увеличился с 0,19 до 0,26, увеличен η_{Π} на ~3,3%.

Заключение

В исследовании описана последовательность и содержание этапов при многопараметрической оптимизации проточных частей ступеней центробежных компрессоров с осерадиальными рабочими колесами.



Puc. 7. Газодинамические характеристики базового и оптимизированного варианта ступени PK-21 Fig. 7. Gas-dynamic characteristics for the base and optimized variants of RK-21 stage

В результате проведенной оптимизации были усовершенствованы модельные двухзвенные ступени серий РК-61, 41, 21. В среднем эффективность ступеней повышена на 1,5–2,5%, а также увеличена зона экономичной работы на 30–60%. Методы многопараметрической автоматизированной расчетной оптимизации могут быть успешно применены в процессе проектирования, поскольку позволяют повышать эффективность проточной части за счет определения наиболее совершенной формы с точки зрения газодинамики.

Литература

- Хетагуров В. А., Слугин П. П., Воронцов М. А., Кубанов А. Н. Опыт и перспективы применения турбодетандерных агрегатов на промысловых технологических объектах газовой промышленности России. // Газовая промышленность. 2018. Т. 11, № 777. С. 14–22.
- 2. Trigg M. A., Tubby G. R., Sheard A. G. Automatic genetic optimization approach to two-dimensional blade profile design for steam turbines // J. Turbomach. 1999.
- Pierret S., Van den Braembussche R. A. Turbomachinery blade design using a navier-stokes solver and artificial neural network // J. Turbomach. 1999.
- Bonaiuti D. et al. Analysis and optimization of transonic centrifugal compressor impellers using the design of experiments technique // J. Turbomach. 2006.
- Kim J. H., Choi J. H., Kim K. Y. Design optimization of a centrifugal compressor impeller using radial basis neural network method // Proceedings of the ASME Turbo Expo. 2009.
- Kim J. H. et al. Multi-objective optimization of a centrifugal compressor impeller through evolutionary algorithms // Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy. 2010.
- Федечкин К. С., Фаррахов Ф. А., Егоров И. Н., Кретинин Г. В. Оптимизации геометрических параметров диагонального компрессора. Авиадвигатели XXI века. Москва 24–27 ноября 2015 г. Сборник тезисов докладов. М.: ЦИАМ, 2015. 1133 с.

References

- Hetagurov V. A., Slugin P. P., Vorontsov M. A., Kubanov A. N. Experience and prospects of using turboexpander units at field technological facilities of the Russian gas industry. *Gazovaya promyshlennost*². 2018. vol. 11, no. 777. p. 14–22. (in Russian)
- 2. Trigg M. A., Tubby G. R., Sheard A. G. Automatic genetic optimization approach to two-dimensional blade profile design for steam turbines. *J. Turbomach.* 1999.
- Pierret S., Van den Braembussche R. A. Turbomachinery blade design using a navier-stokes solver and artificial neural network. *J. Turbomach.* 1999.
- 4. Bonaiuti D. et al. Analysis and optimization of transonic centrifugal compressor impellers using the design of experiments technique. *J. Turbomach.* 2006.
- Kim J. H., Choi J. H., Kim K. Y. Design optimization of a centrifugal compressor impeller using radial basis neural network method. *Proceedings of the ASME Turbo Expo.* 2009.
- Kim J. H. et al. Multi-objective optimization of a centrifugal compressor impeller through evolutionary algorithms. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy*. 2010.
- Fedechkin K. S., Farrahov F. A., Egorov I. N., Kretinin G. V. Optimization of geometric parameters of the diagonal compressor. Aircraft engines of the XXI century. Moscow, November 24–27, 2015. Collection of abstracts. Moscow: CIAM, 2015. 1133 p. (in Russian)

- 8. *Elfert M. u dp.* Experimental and numerical verification of an optimization of a fast rotating high-performance radial compressor impeller // J. Turbomach. 2017.
- 9. *Li X., Liu Z., Lin Y.* Multipoint and Multiobjective Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller Based on Genetic Algorithm // Math. Probl. Eng. 2017.
- Hildebrandt A., Ceyrowsky T. One-dimensional and threedimensional design strategies for pressure slope optimization of high-flow transonic centrifugal compressor impellers // J. Turbomach. 2019.
- 11. Danilishin A. M. et al. Design optimization opportunity of the end stage output plenum chamber of the centrifugal compressor for gas pumping unit // AIP Conference Proceedings. 2018. vol. 2007.
- Vaszi Z., Szabó C., Varga A. Implementing the mathematical model of the throughput of compressor station aggregates // Nonlinear Anal. Model. Control. 2015. vol. 20, no. 2. p. 291–304.
- Danilishin A. M. et al. The methodology for the existing complex pneumatic systems efficiency increase with the use of mathematical modeling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. vol. 232, no. 1.
- 14. Симонов А. М. Исследование эффективности и оптимальное проектирование высоконапорных центробежных компрессорных ступеней. / Труды научной школы компрессоростроения СПбГПУ. Под ред. проф. Ю. Б. Галеркина. СПб.: СПбГПУ, 2010. С. 164–188.
- Боровиков А. В. Улучшение эксплуатационных показателей компрессоров турбонаддува транспортных дизелей оптимизацией газодинамических, геометрических и режимных параметров. Дис.... д-ра техн. наук: 05.04.02 СПб., 2005. 376 с.
- 16. Данилишин А. М., Кожухов Ю. В. Разработка параметрической модели проточной части двухзвенной ступени с осерадиальным рабочим колесом центробежного компрессора. // Территория «Нефтегаз». 2019; 1 (1-2):12–18.
- 17. *Menter F. R.* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994.

Сведения об авторах

Данилишин Алексей Михайлович

Аспирант факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, danilishin_am@mail.ru. SPIN-код: 1162–5118. Scopus Author ID: 56829617000. ORCID: 0000-0002-1213-7114. Web of Science Researcher ID: I-8113–2017.

Кожухов Юрий Владимирович

К. т. н., доцент, доцент факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9. kozhukhov_yv@mail.ru.
SPIN-код: 5756–4994. Scopus Author ID: 56829504700.
ORCID: 0000-0001-7679-9419.
Web of Science Researcher ID: N-9066–2016.

Статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

- 8. Elfert M. et al. Experimental and numerical verification of an optimization of a fast rotating high-performance radial compressor impeller. *J. Turbomach.* 2017.
- 9. Li X., Liu Z., Lin Y. Multipoint and Multiobjective Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller Based on Genetic Algorithm. *Math. Probl. Eng.* 2017.
- Hildebrandt A., Ceyrowsky T. One-dimensional and threedimensional design strategies for pressure slope optimization of high-flow transonic centrifugal compressor impellers. *J. Turbomach.* 2019.
- 11. Danilishin A. М. и др. Design optimization opportunity of the end stage output plenum chamber of the centrifugal compressor for gas pumping unit. *AIP Conference Proceedings*. 2018. vol. 2007.
- Vaszi Z., Szabó C., Varga A. Implementing the mathematical model of the throughput of compressor station aggregates. *Nonlinear Anal. Model. Control.* 2015. vol. 20, no. 2. p. 291–304.
- 13. Danilishin A. M. et al. The methodology for the existing complex pneumatic systems efficiency increase with the use of mathematical modeling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. vol. 232, no. 1.
- Simonov A. M. Efficiency research and optimal design of highpressure centrifugal compressor stages. / Proceedings of the scientific school of compressor engineering of SPbGPU. Edited by prof. Yu. B. Galerkin. St. Petersburg: SPbGPU, 2010. pp. 164–188. (in Russian)
- 15. Borovikov A. V. Improving the performance of turbocharging compressors of transport diesel engines by optimizing gas dynamic, geometric and operating parameters. Dis.... Doctor of Technical Sciences: 05.04.02 St. Petersburg, 2005. 376 p. (in Russian)
- Danilishin A. M., Kozhukhov Y. V. The Development of a Parametric Model of a Flowing Part with Impeller and Vaneless Diffuser of the Centrifugal Compressor Stage. *Oil and Gas Territory.* 2019;1 (1-2):12–18. (in Russian)
- 17. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.* 1994.

Information about authors

Danilishin Aleksei M.

Postgraduate of the Faculty of Energy and Ecotechnologies, ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9. danilishin_am@mail.ru. SPIN-код: 1162–5118. Scopus Author ID: 56829617000. ORCID: 0000-0002-1213-7114. Web of Science Researcher ID: I-8113–2017.

Kozhukhov Yuri V.

Ph. D., Associate Professor, Associate Professor of the Faculty Energy and Ecotechnology, ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9. kozhukhov_yv@mail.ru. SPIN-код: 5756–4994. Scopus Author ID: 56829504700. ORCID: 0000-0001-7679-9419. Web of Science Researcher ID: N-9066–2016.