

Рис. 1. Твёрдотельная модель исходной ступени и наложенная сетка для квазитрёхмерных расчетов  
Fig. 1. Solid-state model of the initial stage and overlaid grid for quasi-three-dimensional calculations

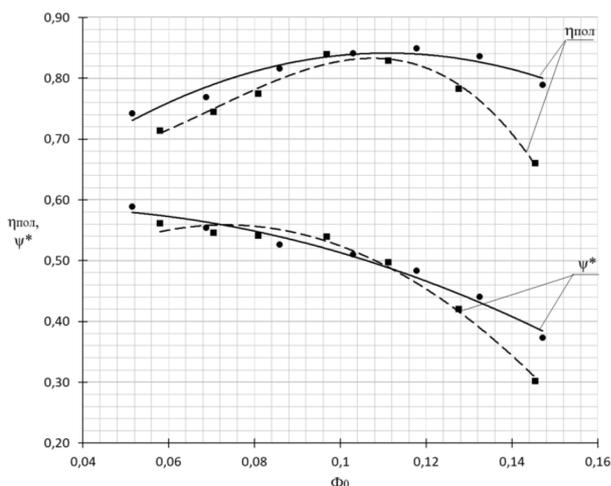


Рис. 2. Зависимости КПД политропного по статическим параметрам и коэффициента напора по полным параметрам от условного коэффициента расхода исследуемой ступени по результатам натурального эксперимента и верификации CFD модели:  
—■— результат натуральных испытаний ступени ГПА при  $Mu = 0,70$ ;

—●— результат CFD расчета ступени ГПА при  $Mu = 0,70$   
Fig. 2. Dependence of the efficiency of a polytropic process on static parameters and the head coefficient on total parameters on the conditional flow coefficient of the investigated stage based on the results of a natural experiment and verification of the CFD model:  
—■— result of natural testing of the gas turbine stage at  $Mu = 0,70$ ;  
—●— result of CFD calculation of the gas turbine stage at  $Mu = 0,70$

С целью автоматизации задачи поиска оптимальной геометрии для совершенствования ступени сжатия турбомашин в АО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа» применяется модуль Fine/Design3D пакета программ Numeca [9].

В качестве примера проектирования и оптимизации представлена модельная ступень центробежного компрессора на условный коэффициент расхода  $\Phi_0 = 0,086$ . Ступень имеет межопорное расположение, включает рабочее колесо (РК), безлопаточный диффузор (БЛД) и обратно-направляющий аппарат (ОНА). Работа над новым рядом проточной части проводится с целью повышения энергетической эффективности и динамической стабильности роторов центробежных компрессоров [10, 11].

Уверенность в достоверности расчёта до этапа экспериментальных исследований обеспечивается созданием новой ступени на базе ступени-аналога с известной газодинамической характеристикой,

на основе которой подтверждается (верифицируется) газодинамическая модель. В данном качестве использована ступень ГПА (газоперекачивающий агрегат) с условным коэффициентом расхода  $\Phi_0 = 0,11$  [12], подтвердившая высокий КПД политропный и широкий диапазон работы по расходу при модельных и натуральных испытаниях. Твёрдотельная модель исходной ступени и её экспериментальная безразмерная газодинамическая характеристика, полученная по значениям параметров, измеренных на входе в ступень и на выходе из БЛД, а также результаты верификации CFD модели, взятые по тем же контрольным сечениям, показаны на рис. 1 и 2.

Использованы блочно-структурированные «низкорейнольдсовы» расчётные сетки. Расчёт проведен в стационарной постановке, модель турбулентности Спалларта–Алмараса выбрана как наиболее склонная к отрывным явлениям с целью иметь больший запас газодинамической устойчивости в эксперименте.

Приведение к требуемому расходу вновь разрабатываемой ступени  $\Phi_0 = 0,11 * 0,086$  осуществляется пропорциональной подрезкой меридионального контура рабочего колеса исходной ступени со стороны основного диска, с постоянным коэффициентом по длине канала. Данную подрезку необходимо было осуществить в связи с увеличением, в соответствии с техническим заданием, относительного втулочного диаметра  $\bar{d}_0 = d_0/D_2$  новой ступени с 0,28 до 0,4, что как раз обеспечивает требуемый коэффициент расхода.

На основе модифицированной по расходу твердотельной модели ступени строилась параметрическая геометрия — дискретно заданные координаты лопаток и меридиональных обводов описывались кривыми с управляемыми полюсами, определялось распределение лопаточных углов и толщин по длине канала. Местоположение полюсов кривых и число лопаток РК и ОНА являются параметрами оптимизации. Построение производилось в ПО Axcent. Параметрическая геометрия ступени с наложенным диапазоном изменения формы проточной части представлена на рис. 3.

Параметрическая геометрия служит основой для построения конечно-элементной низкорейнольдсовой блочно-структурированной расчётной сетки. Создается сеточный шаблон, включающий в себя основную информацию — число ячеек в блоках, периодичность сетки, точки привязки блоков к геометрии. В процессе оптимизации, при изменении геометрических параметров, сетка деформируется вслед за газодинамическим каналом, сохраняя топологию блоков. Сетки одного межлопаточного блока, изменяющиеся в процессе оптимизации, показаны на рис. 4.

Критерием оптимизации является максимум политропного КПД ступени по заторможенным параметрам. Задача однокритериальная, точка помпажа принимается по факту, в силу малых лопаточных углов, помпажный запас получался удовлетворяющим техническому заданию на всех вариантах геометрии. Параметрами оптимизации являются положения полюсов сплайнов, описывающих геометрию проточной части.

Сходимость задачи оптимизации представлена на рис. 5 в виде графика с множеством решений отдельных конструкций ступени. Где по оси абсцисс отложены номер итерации, а по оси ординат — значение политропного КПД ступени.

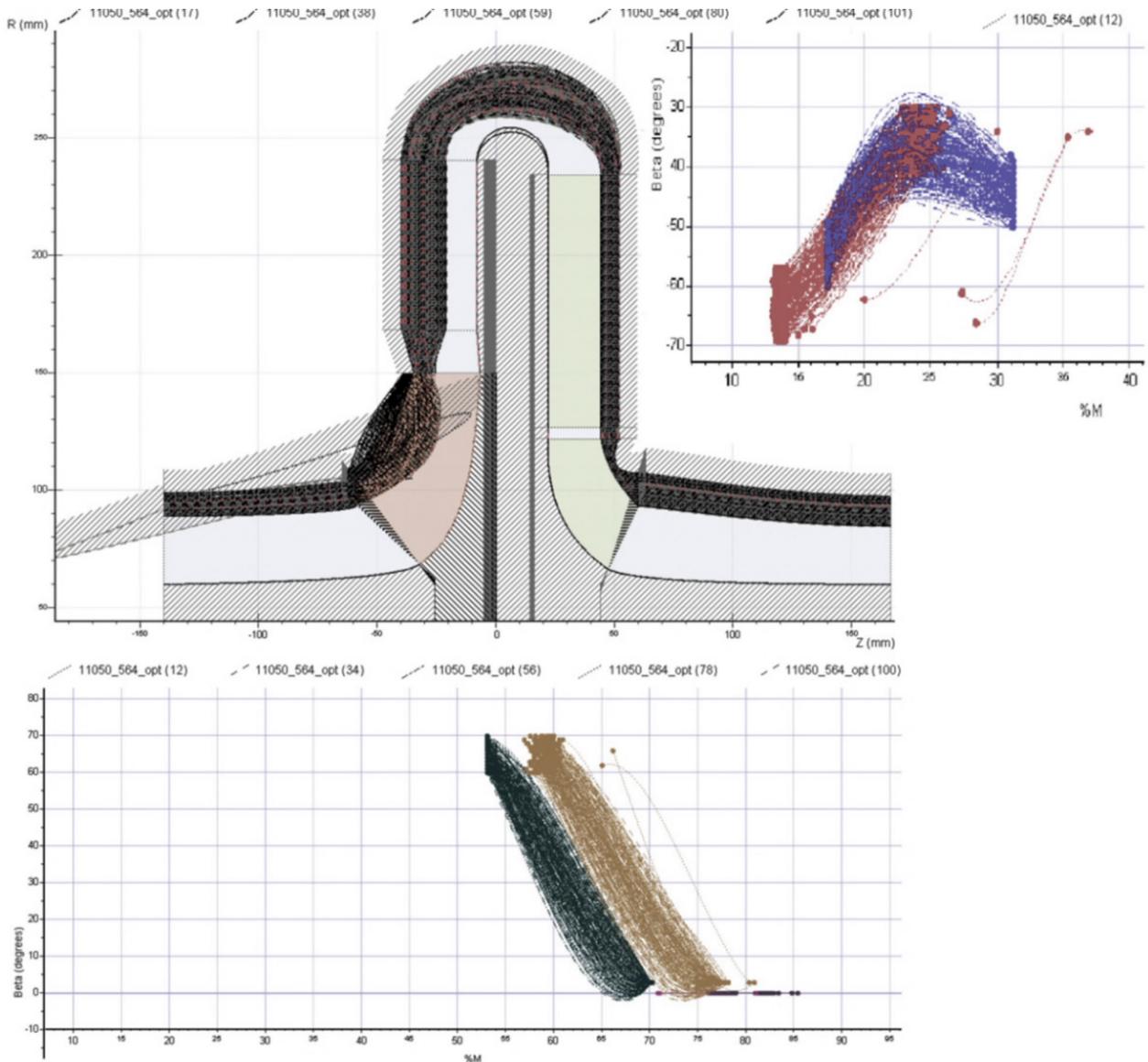


Рис. 3. Параметрическая геометрия ступени с наложенным диапазоном изменения формы проточной части  
 Fig. 3. Parametric geometry of a stage with an imposed range of variation in the shape of the flow passage

На первом этапе оптимизации формировался план эксперимента — геометрия создавалась случайным набором параметров оптимизации в пределах установленных ограничений. Естественно, часть геометрических моделей имела нетехнологичный и нефизичный вид, что приводило к деформации расчётной сетки, расчёт при этом не мог быть выполненным. Поэтому на основе рекомендаций число геометрий (250) было в 10 раз больше параметров оптимизации (21). Каждая геометрия рассчитывалась CFD решателем (синие точки на рис. 5).

Аппроксимирует базу данных модель, которая строится для определения аналитических связей между входными и выходными параметрами. Оптимизационный алгоритм работает на базе суррогатной модели. CFD решение для каждой созданной геометрической формы проточной части ступени проводится на каждой итерации оптимизации. Данные по результатам расчёта добавляются в базу данных, после чего внутренние алгоритмы модуля Fine/Design3D уточняют суррогатную модель для дальнейшего формулирования плана эксперимента. Таким образом, в процессе оптимизации точность суррогатной модели возрастает. Оптимизация, то

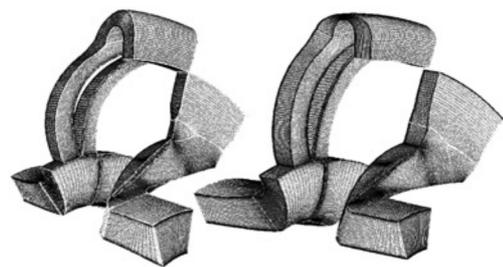
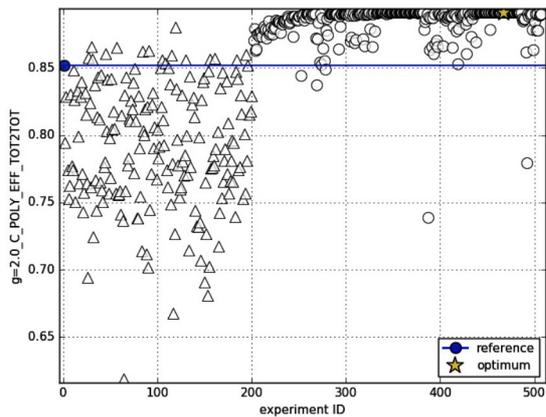


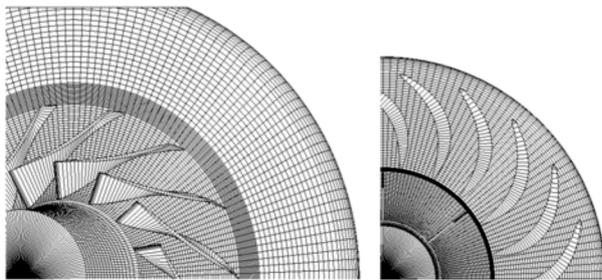
Рис. 4. Сетки одного межлопаточного блока, изменяющиеся в процессе оптимизации  
 Fig. 4. Grids of a single inter-blade block, varying during the optimization process

есть поиск экстремума функции отклика, полученной на основе базы данных, производится с использованием генетических алгоритмов, точки оптимизации обозначены круглыми маркерами.

На рис. 5 видно, что значения точек политропного КПД базы данных (треугольные маркеры) имеют максимальный разброс, а разброс значений точек политропного КПД оптимизации (круглые маркеры)



**Рис. 5. Сходимость задачи оптимизации:**  
треугольные маркеры — случайный набор параметров оптимизации;  
круглые маркеры — целенаправленный поиск максимума политропного КПД в зависимости от итерации  
**Fig. 5. Convergence of the optimization problem**  
triangle markers — random set of optimization parameters;  
circular markers — targeted search for maximum polytropic efficiency depending on the iteration



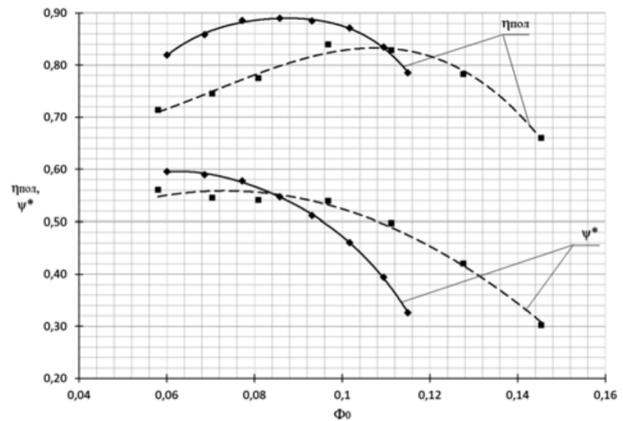
**Рис. 6. Твердотельная модель оптимизированной ступени**  
**Fig. 6. Solid-state model of the optimized stage**

сокращается. При этом дальнейшее решение задачи не приводит к нахождению более эффективной геометрии среди ранее найденных оптимальных конструкций. Поэтому задачу оптимизации можно считать сошедшейся.

Результирующая оптимальная геометрия ступени, её газодинамическая характеристика по результатам CFD расчета, построенная по параметрам в контрольных сечениях на входе и осевой подвод и на выходе из БЛД, а также экспериментальная газодинамическая характеристика, взятая по тем же контрольным сечениям, представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

Одним из ощутимых недостатков газодинамической модели является сложность вариантных расчётов с учетом протечки рабочего тела по покрывному диску с нагнетания ступени на всасывание. Однако данное явление нивелируется применением в новых ступенях АО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа» контактных лабиринтных уплотнений, практически нивелирующих влияние протечки рабочего тела на газодинамическую характеристику ступени.

Таким образом, программный модуль Fine/Design3D хорошо зарекомендовал себя при проектировании ступеней, где требуется создание новой геометрии, отвечающий всем требованиям технического задания.



**Рис. 7. Зависимости КПД политропного по статическим параметрам и коэффициента напора по полным параметрам от условного коэффициента расхода исследуемой ступени по результатам натурального эксперимента и результатам оптимизации проточной части.**

Политропный КПД  
рассчитан по сечениям: осевой вход в ступень —  
выход из диффузора:

— ■ — результат натуральных испытаний ступени ГПА при  $Mu = 0,70$ ;

— ● — характеристика оптимизированной ступени при  $Mu = 0,80$  в результате CFD расчета

**Fig. 7. Dependence of the polytropic efficiency based on static parameters and the head coefficient based on total parameters on the conditional flow coefficient of the investigated stage, as determined by a physical experiment and the optimization results of the flow passage.**

The polytropic efficiency is calculated for the following sections: axial inlet to the stage – exit from the diffuser:

— ■ — result of natural testing of the gas turbine stage at  $Mu = 0,70$ ;

— ● — characteristics of the optimized stage at  $Mu = 0,80$  as a result of CFD calculation

Данный программный модуль значительно облегчает трудоемкий процесс создания геометрической модели. Освобождает от ручного перебора большого количества вариантов различной геометрии, в изысканиях оптимальной формы проточной части, что значительно сокращает временные затраты проектирования.

К недостаткам данного метода можно отнести тот факт, что полученный в процессе оптимизации конечный результат, так же как и промежуточные варианты геометрии, как правило, не до конца соответствуют требованиям технологичности, то есть имеют сложные для механической обработки формы. Изготовление таких деталей несёт в себе повышенные трудозатраты. Указанный недостаток в процессе оптимизации требует последующего упрощения форм проточных частей с применением САПР инженером-конструктором.

Модификации подвергается наиболее удачная, с точки зрения технологичности, геометрическая модель, удовлетворяющая критерию оптимизации, причём таким образом, чтобы конечный результат имел минимальные отклонения от полученных результатов в ходе оптимизации.

#### Список источников

1. Cumpsty N. A. Compressor Aerodynamics. 5th ed. Longman, London. 1999. 509 p.
2. Hassan M. A., Reddy K. T. Energy optimization of a centrifugal compressor along with wedge diffuser using ANN-coupled CFD // Journal of the Brazilian Society of Mechanical

Sciences and Engineering. 2022. Vol. 44 (10). 442. DOI: 10.1007/s40430-022-03754-x.

3. Baert L., Beauthier C., Leborgne M. [et al.]. Surrogate-Based Optimisation for a Mixed-Variable Design Space: Proof of Concept and Opportunities for Turbomachinery Applications // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. Vol. 2 C: Turbomachinery. 2015. DOI: 10.1115/ GT2015-43254.

4. Ochabski T., van der Spuy J., Hildebrandt T. A Large Design Space Multidisciplinary Optimization of a Mixed Flow Micro Gas Turbine Compressor Stage // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Vol. 8: Industrial and Cogeneration; Manufacturing Materials and Metallurgy; Marine; Microturbines, Turbochargers, and Small Turbomachines. 2020. DOI: 10.1115/ GT2020-14259.

5. Huang S., Lu X., Han G. [et al.]. Research on aerodynamic optimization design method and flow mechanism of a high-subsonic compressor cascade // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2023. Vol. 16 (1). P. 316– 334. DOI: 10.1080/ 19942060.2021.2020170.

6. Неверов В. В., Любимов А. Н., Чеглаков И. В. Вычислительная газодинамика как инструмент повышения качества, надежности и скорости проектирования проточных частей турбокомпрессоров // Компрессоры и компрессорное оборудование: тр. Междунар. симп. им. К. П. Селезнева. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. С. 42– 49. DOI: 10.18720/ SPBPU/ 2/ id18-98. EDN: YVGDVZ.

7. 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.

8. Маренина Л. Н., Галеркин Ю. Б., Дроздов А. А. [и др.]. Опыт оптимизации неподвижных элементов ступеней центробежных компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. 2022. № 1. С. 2– 11. EDN: VUCKZO.

9. NUMECA. URL: <https://www.numeca.de/en/products-design-optimisation/> (дата обращения: 27.09.2023).

10. Хасанов Н. Г., Дубинин Е. В., Хуснутдинов И. Ф., Лунев А. Т. Численное моделирование характеристик центро-

бежных компрессоров и турбин в АО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа» // Компрессорная техника и пневматика. 2023. № 2. С. 28– 31. EDN: PSHWBG.

11. Хасанов Н. Г., Хуснутдинов И. Ф., Муртазин Р. Ф., Дубинин Е. В. Расчётно-экспериментальное исследование высокорасходной модельной ступени центробежного компрессора с повышенным втулочным отношением // Компрессорная техника и пневматика. 2022. № 4. С. 37– 39. EDN: DKVXSF.

12. Лунев А. Т. Разработка высокоэффективных сменных проточных частей центробежных компрессоров газоперекачивающих агрегатов: автореф. дисс. канд. наук. Казань, 2005. 16 с.

**ДУБИНИН Евгений Владимирович**, начальник бюро АО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», г. Казань.

Адрес для переписки: [evgeniy.dubinin@niitk.ru](mailto:evgeniy.dubinin@niitk.ru)

**ИДИЯТУЛЛИН Булат Фанисович**, инженер по расчетам и режимам 2-й категории АО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», г. Казань.

Адрес для переписки: [BuLat.Idiatullin@niitk.ru](mailto:BuLat.Idiatullin@niitk.ru)

**ХАСАНОВ Нариман Гаязович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», г. Казань.

SPIN-код: 7765-5764

AuthorID (РИНЦ): 898713

Адрес для переписки: [Nariman.Khasanov@niitk.ru](mailto:Nariman.Khasanov@niitk.ru)

#### Для цитирования

Дубинин Е. В., Идиятуллин Б. Ф., Хасанов Н. Г. Оптимизация ступеней центробежных компрессоров // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 4. С. 33– 39. DOI: 10.25206/ 2588-0373-2023-7-4-33-39.

Статья поступила в редакцию 28.09.2023 г.

© Е. В. Дубинин, Б. Ф. Идиятуллин, Н. Г. Хасанов

## OPTIMIZATION OF CENTRIFUGAL COMPRESSOR STAGES

E. V. Dubinin,  
B. F. Idiyatullin, N. G. Khasanov

NIIturbokompressor JSC,  
Russia, Kazan, Sibirsky Trakt str., 40, 420029

The article describes a hydraulic efficiency increase in the centrifugal compressor stage using automatic optimization algorithms. The optimization criterion is the polytropic efficiency of the intermediate compressor stage. The sequence of stages of the optimization process in the Fine/ Design3D software module of the Numeca software package is presented. The creating process a solid model of the compression stage is shown. The performance curves of the developed stage after optimization of the shape of the rotor and stator elements are also presented.

**Keywords:** flow pass, centrifugal compressor, energy efficiency, performance curves, CFD, Numeca, optimization.

### References

1. Cumpsty N. A. Compressor Aerodynamics. 5th ed. Longman, London. 1999. 509 p. (In Engl.).
2. Hassan M. A., Reddy K. T. Energy optimization of a centrifugal compressor along with wedge diffuser using ANN-coupled CFD // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2022. Vol. 44 (10). 442. DOI: 10.1007/s40430-022-03754-x. (In Engl.).
3. Baert L., Beauthier C., Leborgne M. [et al.]. Surrogate-Based Optimisation for a Mixed-Variable Design Space: Proof of Concept and Opportunities for Turbomachinery Applications // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. Vol. 2 C: Turbomachinery. 2015. DOI: 10.1115/ GT2015-43254. (In Engl.).
4. Ochabski T., van der Spuy J., Hildebrandt T. A Large Design Space Multidisciplinary Optimization of a Mixed Flow Micro Gas Turbine Compressor Stage // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Vol. 8: Industrial and Cogeneration; Manufacturing Materials and Metallurgy; Marine; Microturbines, Turbochargers, and Small Turbomachines. 2020. DOI: 10.1115/ GT2020-14259. (In Engl.).
5. Huang S., Lu X., Han G. [et al.]. Research on aerodynamic optimization design method and flow mechanism of a high-subsonic compressor cascade // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2023. Vol. 16 (1). P. 316– 334. DOI: 10.1080/ 19942060.2021.2020170. (In Engl.).
6. Neverov V. V., Lyubimov A. N., Cheglakov I. V. Vychislitel'naya gazodinamika kak instrument povysheniya kachestva, nadezhnosti i skorosti proyektirovaniya protochnykh chastey turbokompressorov [Computational gas dynamics as a tool for improving the quality, reliability and velocity of turbocompressors flow parts design] // Kompresory i kompressoroye oborudovaniye. *Compressors and Compressor Equipment*. Saint Petersburg, 2018. P. 42– 49. DOI: 10.18720/ SPBPU/ 2/ id18-98. EDN: YVGDVZ. (In Russ.).
7. Danilishin A. M., Kozhukhov Yu. V. Algoritm i primery mnogoparametricheskoy avtomatizirovannoy raschetnoy optimizatsii kompressornykh stupeney s oseradial'nymi rabochimi kolesami turbodetandernykh agregatov [Algorithm and the examples of multiparametric automated computational optimization for turboexpander compressor stage 3D impellers] // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No. 2. P. 27– 34. DOI: 10.17586/ 1606-4313-2022-21-2-27-34. (In Russ.).
8. Marenina L. N., Galerkin Yu. B., Drozdov A. A. [et al.]. Opyt optimizatsii nepodviznykh elementov stupeney tsentrobezhnykh kompressorov [Creation of parametrized model of return channel flow path for CFD-optimization] // Kompresornaya tekhnika i pnevmatika. *Compressor and Pneumatics*. 2022. No. 1. P. 2– 11. EDN: VUCKZO. (In Russ.).
9. NUMECA. URL: <https://www.numeca.de/en/products-design-optimisation/> (accessed: 27.09.2023). (In Engl.).
10. Khasanov N. G., Dubinin E. V., Khusnutdinov I. F., Lunev A. T. Chislennoye modelirovaniye karakteristik tsentrobezhnykh kompressorov i turbin v AO «NIIturbokompressor im. V. B. Shneppa» [Centrifugal compressor and turbines numerical performance modeling in JSC «NIIturbokompressor»] // Kompresornaya tekhnika i pnevmatika. *Compressor and Pneumatics*. 2023. No. 2. P. 28– 31. EDN: PSHWBG. (In Russ.).
11. Khasanov N. G., Khusnutdinov I. F., Murtazin R. F., Dubinin E. V. Raschetno-eksperimental'noye issledovaniye vysokoraskhodnoy model'noy stupeni tsentrobezhnogo kompressora spovyshennym vtulochnym otnosheniyem [Numerical and experimental study of a high flow centrifugal compressor master stage with a high hub to tip ratio] // Kompresornaya tekhnika i pnevmatika. *Compressor and Pneumatics*. 2022. No. 4. P. 37– 39. EDN: DKVXSf. (In Russ.).
12. Lunev A. T. Razrabotka vysokoeffektivnykh smennykh protochnykh chastey tsentrobezhnykh kompressorov gazoperekachivayushchikh agregatov [Development of highly efficient replaceable flow parts for centrifugal compressors of gas pumping units]. Kazan, 2005. 16 p. (In Russ.).

**DUBININ Evgeniy Vladimirovich**, Chief of Bureau,  
NIIturbokompressor JSC, Kazan.  
Correspondence address: [evgeniy.dubinin@niitk.ru](mailto:evgeniy.dubinin@niitk.ru)

**IDIYATULLIN Bulat Fanisovich**, 2nd Category Engineer for Calculations and Modes, NIIturbokompressor JSC, Kazan.

Correspondence address: Bulat.Idiyatullin@niitk.ru

**KHASANOV Nariman Gayazovich**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, NIIturbokompressor JSC, Kazan.

SPIN-code: 7765-5764

AuthorID (RSCI): 898713

Correspondence address: Nariman.Khasanov@niitk.ru

#### For citations

Dubinin E. V., Idiyatullin B. F., Khasanov N. G. Optimization of centrifugal compressor stages // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 33– 39. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-33-39.

Received September 28, 2023.

© E. V. Dubinin, B. F. Idiyatullin,  
N. G. Khasanov