

Маренина Любовь Николаевна

канд. техн. наук, доцент

Дроздов Александр Александрович

д-р техн. наук, профессор

Садовский Николай Иванович

канд. техн. наук, доцент

Галеркин Юрий Борисович

д-р техн. наук, профессор

Семеновский Василий Борисович

канд. техн. наук, доцент

Яблоков Алексей Михайлович

старший преподаватель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический

университет Петра Великого»

г. Санкт-Петербург

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАЗМЕРОВ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕПОДВИЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ**

Аннотация: в статье рассматривается вопрос CFD-оптимизации обратно направляющих аппаратов (ОНА) многоступенчатых центробежных компрессоров с безлопаточными диффузорами. Исследованы ступени разной быстротходности методом универсального моделирования проф. Ю. Галеркина. Оптимизированы ключевые геометрические параметры ОНА (число лопаток, углы, радиусы скругления поворотного колена). Получены зависимости оптимальных соотношений и площадей сечений. Установлено влияние ширины БЛД на устойчивость и эффективность НЭ в широком диапазоне расходов.

Ключевые слова: центробежный компрессор, обратно-направляющий аппарат, коэффициент потерь, КПД.

Введение

Несмотря на десятилетия усилий по совершенствованию газодинамического проектирования промышленных центробежных компрессоров, это по-прежнему актуально.

Характер течения и характеристики эффективности, рассчитанные программами вычислительной газодинамики, хорошо соответствуют экспериментальным данным [1; 2; 5; 8].

В работе [4] представлены результаты CFD-оптимизации ряда обратно направляющих аппаратов (ОНА) ступеней многоступенчатых центробежных компрессоров. Поворотному колесу ОНА предшествовал осесимметричный радиальный канал подобный БЛД, но с условием не-прилипания потока к ограничивающим поверхностям. Это позволило рассчитать коэффициенты потерь ОНА в «чистом» виде, при равномерной структуре потока и отсутствии пограничных слоев на входе. Ниже представлены результаты исследования ОНА в составе ступени с безлопаточным диффузором. Рассчитаны коэффициенты потерь и КПД неподвижных элементов ступени в составе БЛД+ОНА, рассмотрены особенности течения. Объектами оптимизации были наиболее важные геометрические параметры обратно направляющих аппаратов.

Объекты и цели исследования

Цель исследования: изучить CFD – методами возможность повышения эффективности ОНА в составе ступеней разной быстроходности с безлопаточными диффузорами. В исследовательской и проектной практике авторы используют Метод универсального моделирования, основы которого представлены проф. Ю. Галеркиным в [3].

Системы уравнений Метода определяют размеры проточной части ступени (по отношению к диаметру рабочего колеса) по значениям коэффициентов рас-

хода и напора Φ_{des} ($\frac{\bar{m}}{\frac{P_{inl}^*}{RT_{inl}^*} \frac{\pi}{4} D_2^2 u_2}$), ψ_{Tdes} ($\psi_T = \frac{c_{u2}}{u_2}$) на расчетном режиме. Эти коэффициенты – основные параметры проектирования проточной части.

расход. Для соединения сеток основных и спрямляющей лопаток использовался интерфейс «Frozen rotor», необходимый для корректной передачи параметров потока при угловом смещении секторов.

Общее количество элементов расчетной области составляет 550 000 элементов, при построении сетки выдерживалось значение безразмерного пристеночного элемента y^+ не более 2 для корректного разрешения пограничного слоя с использованием модели турбулентности SST (Shear stress transport).

Цель оптимизации заключалась в достижении минимального коэффициента потерь НЭ в расчётной точке, при условии устойчивой работы в нужном диапазоне производительности и удовлетворительной структуре потока на выходе из ОНА. Для подтверждения эффективности неподвижных элементов на нерасчетных режимах для каждого оптимизированного варианта рассчитывались характеристики коэффициента потерь ОНА и неподвижных элементов в целом, а также КПД проточной части «БЛД + ОНА».

Оптимизация проводилась в два этапа: сначала подбирались оптимальное число лопаток и соответствующий ему лопаточный угол для безударного обтекания; далее у оптимального варианта варьировались значения внутреннего и наружного радиусов скругления ПК.

В ходе работы было оптимизировано 15 вариантов исходной геометрии ОНА с разными параметрами проектирования Φ_{des} и $\psi_{T des}$. Оптимизация первого этапа требовала расчета около 80 вариантов исполнения, на втором этапе – 40. Всего в процессе оптимизации было рассчитано приблизительно 1800 ОНА.

Результаты

На рисунках ниже показаны некоторые геометрические параметры НЭ, полученные в результате оптимизации. Обращают внимание нетипично маленькие входные углы лопаток ОНА малорасходных ступеней. Структура течения в ОНА малорасходных ступеней рассмотрена ниже. На рисунке 2 (слева) показаны оптимальные числа лопаток ОНА.

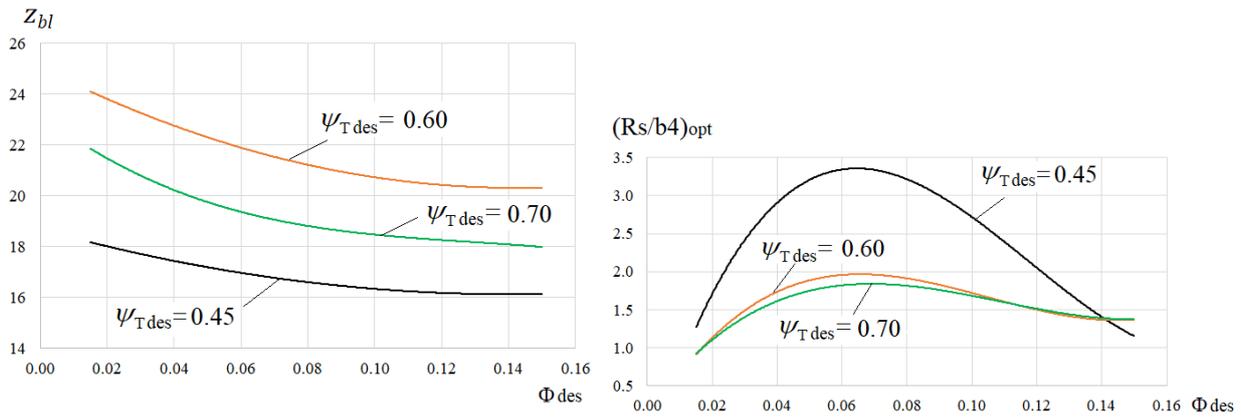


Рис. 2. Оптимальные размеры ОНА: число лопаток ОНА (слева)

при разных параметрах проектирования $z_{bl} = f(\Phi_{des}, \psi_{Tdes})$

и соотношения между радиусом кривизны внутренней стенки поворотного колена и шириной поворотного колена на входе (справа)

При одинаковой высоте лопаток $b_5 = b_6$ входные углы лопаток маленькие, длина лопаток большая, поэтому число лопаток меньше, чем у ОНА с $b_5 < b_6$.

Главные результаты оптимизации поворотного колена показаны на рисунках 2 (справа) и 3. На рисунке 2 (справа) показаны оптимальные соотношения между радиусом кривизны внутренней стенки поворотного колена и шириной поворотного колена на входе. Нелинейная зависимость

$(R_s/b_4)_{opt} = f(\Phi_{des}, \psi_{Tdes})$ определяется зависимостями $F_5/F_4 = b_5/b_4$. То же самое можно сказать о зависимости оптимального соотношения между проходным сечением в середине поворотного колена и площадью на входе в колено на рисунке 3.

Отношение F_5/F_4 уменьшается от 2,6–2,2 у малорасходных ступеней, до 1,5–1,8 у высокорасходных.

На рисунке 4 показаны коэффициенты потерь оптимизированных неподвижных элементов ступеней БЛД+ОНА.

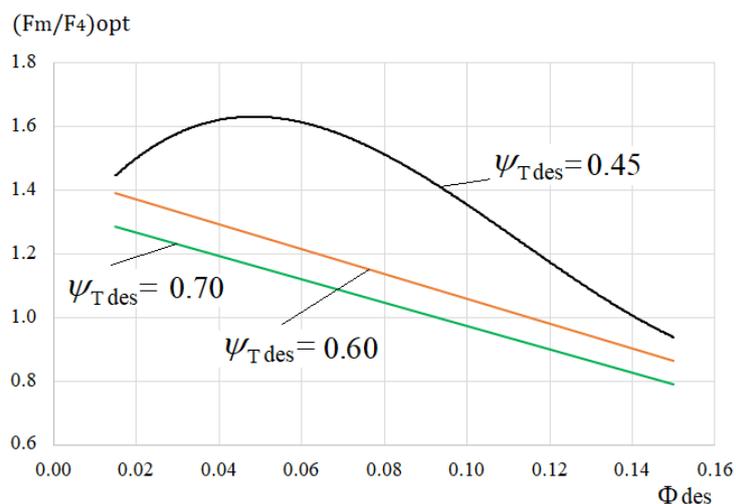


Рис. 3. Оптимальное отношение площади плоского сечения в середине поворотного колена к площади кольцевого сечения на выходе из БЛД

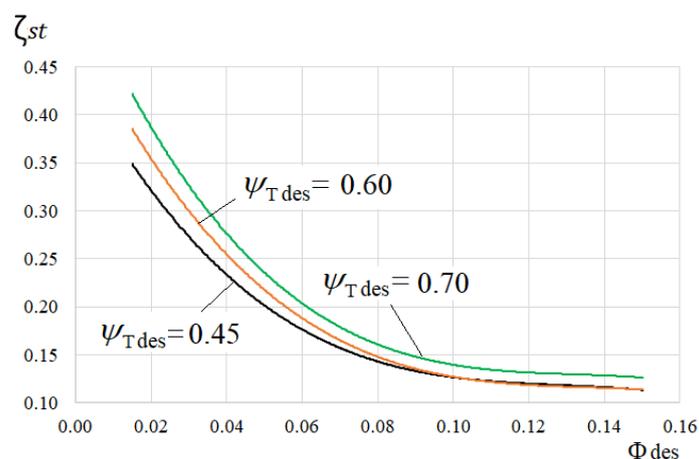


Рис. 4. Коэффициент потерь неподвижных элементов ступеней

с разными параметрами проектирования $\zeta_{st} = f(\Phi_{des}, \psi_{Tdes})$

В большинстве случаев коэффициент потерь ζ_{st} меньше у низконапорных ступеней. У высокорасходных ступеней при $\Phi_{des} > 0,09$ коэффициенты потерь низконапорной и средненапорной ступени сравниваются. Это связано с тем, что относительная ширина БЛД у ступеней с $\psi_{Tdes} = 0,45$ меньше. При одинаковом $\Phi_{расч}$ в узком БЛД потери трения больше, хотя там больше угол потока.

Характеристики КПД неподвижных элементов у исследованных ступеней показаны на рисунках 5–6.

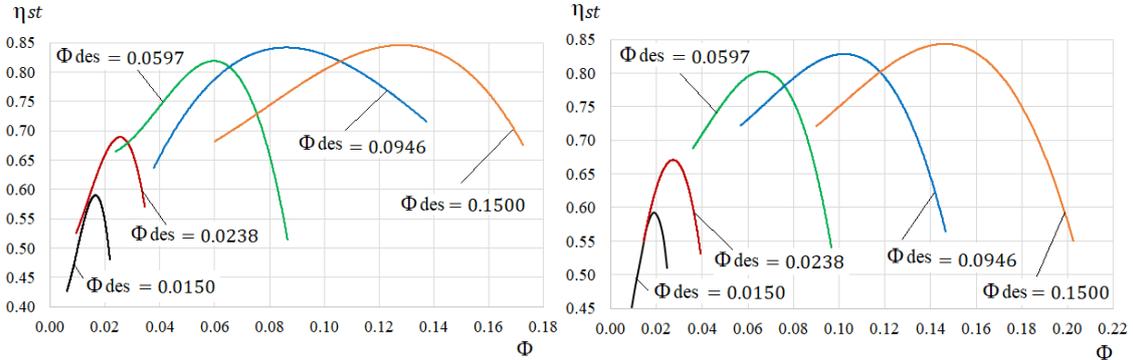


Рис. 5. Характеристики КПД неподвижных элементов $\eta_{st} = f(\Phi)$

с разными Φ_{des} при $\Psi_{Tdes} = 0,45$ (слева) и $\Psi_{Tdes} = 0,60$ (справа)

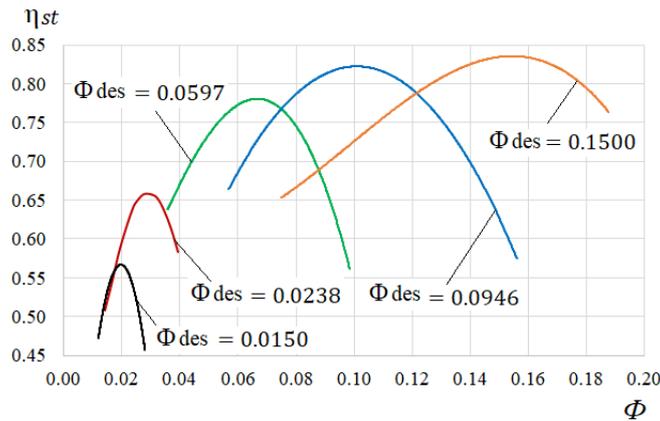


Рис. 6 – Характеристики КПД неподвижных элементов $\eta_{st} = f(\Phi)$

с разными Φ_{des} при $\Psi_{Tdes} = 0,70$

Как следует из графиков на рисунке 6, КПД НЭ на расчетном режиме $\Phi_{des} = 0,15$ у ступени с $\Psi_{Tdes} = 0,45$ меньше, чем у других ступеней. Но при меньшем коэффициенте расхода $\Phi_{opt} \approx 0,13$ КПД достигает почти 85%. Это больше, чем максимальный КПД НЭ ступеней с $\Psi_{Tdes} = 0,60$ и $0,70$. Смещение режима максимального КПД в сторону расхода меньше расчетного характерно

для ступеней с малыми ψ_{Tdes} , у которых крутая напорная характеристика. Это демонстрируют также расчеты характеристик Методом универсального моделирования [7]. У ступеней с $\psi_{Tdes} = 0,45$ значительно меньше относительная ширина БЛД. Поэтому при $\Phi_{des}=0.15$ у этой ступени CFD-расчет дает устойчивое решение вплоть до $\Phi \approx 0,06$, а у НЭ ступеней с $\psi_{Tdes} = 0,60$ и $0,70$ только до $\Phi \approx 0,080$.

Заключение

Представленные оптимальные геометрические соотношения неподвижных элементов ступеней промежуточного типа сильно зависят от не оптимизируемых размеров и параметров $\bar{b}_4 = \bar{b}_3, \bar{D}_4, \alpha_{3des}$, значения которых характерны для используемой авторами методики первичного проектирования. Второй определяющий фактор: по результатам ранее проведенной оптимизации у всех исследованных ОНА одинаковая высота лопаток, что привело к большой диффузорности поворотного колена и необычно маленьким входным углам лопаток ОНА. Авторы полагают, тем не менее, что количественные данные об эффективности исследованных неподвижных элементов не очень далеки от наилучших, и могут быть интересны для специалистов.

Список литературы

1. Моделирование характеристик одноступенчатого центробежного компрессора газоперекачивающего агрегата / А.И. Боровков, И.Б. Воинов, М.А. Никитин [и др.] // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т. 24. №3. – С. 153–175. DOI 10.18721/JEST.240313. EDN YNHJTF
2. Положительный опыт CFD-моделирования характеристик центробежных компрессорных ступеней и анализ щелевых потерь / Л.Н. Маренина, Ю.Б. Галеркин, А.А. Дроздов, К.В. Солдатова [и др.] // Компрессорная техника и пневматика. – 2022. – №2. Ч. 1. – С. 18–25. EDN UFBZYC

3. Селезнев К.П. Центробежные компрессоры / К.П. Селезнев, Ю.Б. Галеркин. – Л.: Машиностроение, 1982.
4. Numerical simulation and optimization of return channels of centrifugal compressor stages of different specific speed / Yu.B. Galerkin, L.N. Marenina, K.V. Soldatova, A.A. Drozdov // Oil and Gas Engineering: AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2412. – 030018. DOI 10.1063/5.0075058. EDN NKKJVO
5. Solovyeva O. Mathematical model of centrifugal compressor vaneless diffuser based on CFD calculations / O. Solovyeva, A. Drozdov // The 2nd International Conference on High Speed Turbomachines and Electrical Drives (HSTED-2020): E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 178. – 01013. DOI 10.1051/e3sconf/202017801014. EDN RNPSMG
6. Marenina L. Stator elements optimization of centrifugal compressor intermediate type stage by CFD methods / L. Marenina, Yu. Galerkin, A. Drozdov // The 2nd International Conference on High Speed Turbomachines and Electrical Drives: E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 178. – 01013. DOI 10.1051/e3sconf/202017801020. EDN QFTGKY
7. Rekstin A.F. Experience of application the computer program based on a simplified mathematical model for industrial centrifugal compressors candidates / A.F. Rekstin, K.V. Soldatova, Yu.B. Galerkin // International Conference on Compressors and their Systems 2019: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 604. – 012045. DOI 10.1088/1757-899X/604/1/012045. EDN LIOSWO
8. Штаничев Р.А. Верификации результатов численного моделирования малорасходной ступени центробежного компрессора с экспериментальными данными с помощью программных комплексов Numeca FineTurbo и Ansys CFX / Р.А. Штаничев, А.М. Яблоков, Н.И. Садовский // Вестник Международной академии холода. – 2021. – №3. – С. 32–38. DOI 10.17586/1606-4313-2021-20-3-32-38. EDN QHDJZJ