

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БАЗОВЫХ МОДЕЛЬНЫХ СТУПЕНЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

А.М. Ахметзянов, Е.В. Дубинин, **Н.Г. Хасанов**,

И.Ф. Хуснутдинов

АО «НИИ Турбокомпрессор», Казань, *niitk@niitk.ru*

Проектирование ступени промежуточного типа.

Проектирование центробежных компрессоров на гарантированный уровень расхода, эффективности и напора возможно путем пересчёта характеристик модельной ступени на натурные условия. В АО «НИИ Турбокомпрессор» применяются ряды модельных ступеней, как собственной разработки, так и модифицированные ступени лицензионного ряда Dresser Klark.

Используемые ступени не в полной мере удовлетворяют возросшие требования к компрессорной технике и требуют модификации с целью повышения газодинамических качеств проточной части и повышения динамической стабильности ротора увеличением относительного диаметра втулки колеса с 0.27 до 0.4. Уменьшение диаметра корпусов сжатия требует расширения области применения ряда до условного коэффициента расхода $\phi_0=0.13$. Ограничения проектирования: осевой размер $z \leq 0.2$, условное число Маха $M_U=0.6...0.95$.

В распоряжении проектантов имелась высокорасходная модельная ступень с $\phi_0=0.13$ рассчитанная и испытанная ранее при отсутствии современных инструментов газодинамического проектирования. С целью снижения затрат на проектирование и для верификации модели, данная ступень перепроектирована. Расчётная (CFD) и экспериментальная характеристика приведена на рисунке 1, верификация газодинамической модели приемлема для дальнейших исследований. Задача решена в стационарной постановке RANS – методом, с замыканием системы уравнений моделью турбулентности Спаларта-Аллмараса. Начальные условия при нормальной атмосфере, рабочее тело – идеальный воздух, диаметр колеса 300мм. Размер сетки 2,5 млн. ячеек (из

них 1 млн. – для описания протечки между покрывным диском и колесом) Используются адаптивные пристеночные функции.

Анализ поверхностей тока в рабочей точке в CFD модели показал срыв потока на задней поверхности лопатки рабочего колеса (РК) и плохое натекание на входную кромку обратно-направляющего аппарата (ОНА). Срыв усугублен влиянием перетечки по покрывному диску (притрастовая полость).

В ПК Concepts NREC Axcent исходное колесо параметризовано, лопатка описана распределением углов и толщин по длине канала. Меридиональные обводы колеса описаны сплайнами. С помощью MST – анализа рассчитана величина газодинамической нагрузки. При модификации колеса, распределение нагрузки смещено с конца лопатки в середину канала путем уменьшения выходного лопаточного угла с 70 до 55 градусов, и перераспределения углов в середине канала. Сохранены меридиональные обводы колеса, что позволило применить старый экспериментальный стенд.

ОНА модифицирован изменением угла входной кромки с 28 до 22 градусов для предотвращения ударного входа.

Расход перетечки по покрывному диску оказал сильное влияние на характеристику ступени, проведены сравнительные расчёты. Затруднения в расчёте вызывает нагрев протечки, находящейся в адиабатных условиях. В модифицированной ступени применено контактное лабиринтное уплотнение (зазор лабиринта снижен с 0.2 мм. до 0.005 мм.), что в последствии будет проверено экспериментально.

Экспериментальные и расчётные характеристики модифицированной модельной ступени приведены на рисунке 1.

Рассогласование расчёта и эксперимента в модернизированной ступени можно объяснить разбитым уплотнением при эксперименте.

Проектирование ступени концевой типа для газоперекачивающего агрегата.

По заказу ПАО «Газпром» разрабатывается проточная часть одноступенчатого нагнетателя природного газа с осевым входом и политропным КПД в рабочей точке не менее 89%. В рамках технического задания, переходя к безразмерным величинам, необходимо сформировать ряд ступеней, ограниченных $\phi_0=0.075$ (высокорасходная) и $\phi_0=0.035$ (быстроходная).

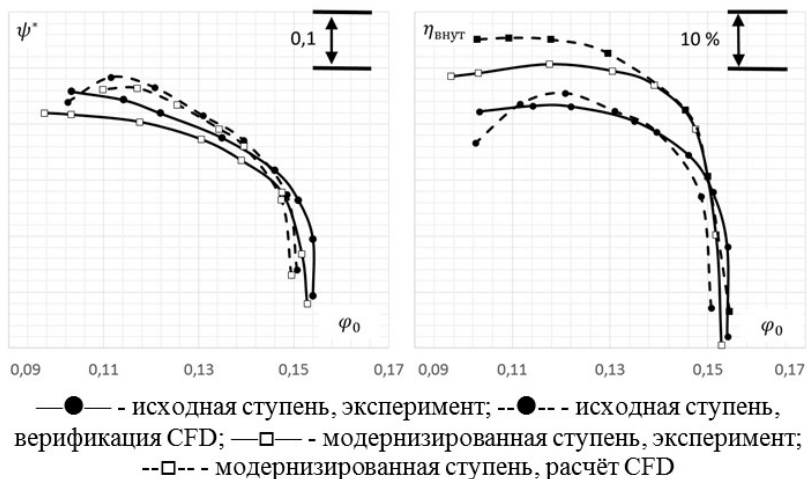


Рис. 1. Расчётные и экспериментальные характеристики

Проектирование высокорасходного исполнения ступеней ведется на основе ступени – аналога низконапорной ступени, испытанной ранее в концевом исполнении. Ступень имеет политропный КПД до 85 процентов с оптимумом при $\phi_0=0.085$. Ступень испытана с хорошей воспроизводимостью экспериментальных данных, прошла эксплуатацию на ГПА.

Результаты предварительной верификации расчётной модели, проведенной по параметрам на выходе из безлопаточного диффузора в ПО Numesa FINE/Turbo. Согласие расчётных и экспериментальных данных хорошее.

Достижение определенным техзаданием политропного КПД проведено модификацией статорных элементов. На основе измеренных в CFD модели параметров потока на выходе из колеса, разработан лопаточный диффузор с 18 лопатками. В качестве выходного устройства применена свернутая на бок внешняя улитка. Расчётная сетка улитки блочно-структурированная, с конформным соединением блоков.

Расчётная характеристика ступени с модифицированной статорной частью приведена на рисунке 2. Достигнут проектный уровень политропного КПД, применение лопаточного диффузора не повлияло на диапазон работы ступени.

Разработка быстроходной ступени с $\phi_0=0.035$ наиболее очевидным способом – путем подрезки высокорасходного

варианта по меридиональному контуру, оказалась неуспешной. Характеристика оказалась заниженной. Потеря КПД составляет 4 абсолютных процента, 1,5% внутреннего КПД подрезанная геометрия теряет из-за увеличения относительного влияния протечки по покрывному диску, и 3% ввиду газодинамического несовершенства более узкого канала.

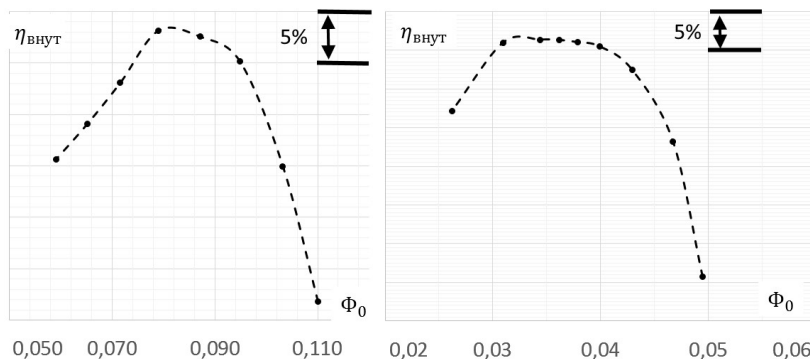


Рис. 2. Расчётные характеристики быстроходного ГПА. Слева – высокорасходная ступень, справа - быстроходная

Быстроходная ступень спроектирована заново сквозным методом в ПК Concept NREC Compal по средней линии тока, с привлечением эмпирических зависимостей об углах отставания и коэффициентах потерь, в одномерной постановке. Далее, в первом приближении, в ПК Axcent спрофилирована геометрия проточной части, и рассчитана в Numeca FINE/Turbo.

Достичь требуемых параметров на основе одномерного проектирования не удалось, сложность задачи требует постановки задачи автоматической оптимизации. Полученная твердотельная геометрия параметризована описанием лопаточных аппаратов и меридиональных обводов сплайнами. Варьируются координаты полюсов сплайна. План эксперимента формируется для равномерного и равновероятного выбора варьируемых параметров (19 параметров).

На основе рассчитанной в CFD по плану эксперимента базе данных методами нейронных сетей построена суррогатная модель – многомерная аппроксимация целевой функции. В процессе поиска экстремума функции, ПО Numeca FINE/Design комбинирует параметры оптимизации, селекционируя результаты

с наиболее высоким КПД, обращаясь к суррогатной модели, а не к CFD для экономии времени. Задача оптимизации однокритериальная, по максимуму изоэнтропийного КПД. В CFD расчёте проверяется только лучшее решение в популяции. Расчёт ведется на грубой упрощенной сетке (уровень вложенности 1 1 1), в 8 раз меньше необходимой для качественного разрешения потока (0 0 0).

На основе оптимизированной геометрии на подробной сетке с учётом перетечек по покрывному диску построена характеристика быстроходной ступени, рисунок 2. В качестве выходного устройства применена свернутая на бок внешняя улитка. Характеристика достигла проектного КПД в расчётной точке и имеет достаточные запасы газодинамической устойчивости. Планируются экспериментальные исследования.