

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УНИФИЦИРОВАННОГО РЯДА СТУПЕНЕЙ ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ ВЫСОКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ

Ахметзянов А.М., Якимов Д.Е., Дубинин Е.В., Идиятуллин Б.Ф., Хасанов Н.Г.

АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», Казань, Россия

Аннотация

В статье описан процесс разработки ряда унифицированных ступеней сжатия центробежного компрессора, используемых при проектировании промышленных многоступенчатых компрессоров с межопорным расположением рабочих колёс на основе теории подобия. Проектируемый ряд отличают высокое втулочное отношение и эффективность. Приводятся расчётные и экспериментальные результаты. Разрабатываемый ряд проточной части характеризуется широким диапазоном применения по расходу и условным числам Маха, а также высоким уровнем энергетической эффективности.

Ключевые слова: ступень центробежного компрессора, политропный КПД, оптимизация, CFD, Numeca Fine/Turbo, проектирование.

DEVELOPING OF UNIVERSAL MASTER STAGES FOR CENTRIFUGAL COMPRESSORS WITH HIGH DYNAMIC STABILITY

Ahmetzyanov A.M., Yakimov D.E., Dubinin E.V., Idiyatullin B.F., Hasanov N.G.

JSC "NIIturbokompressor named after V.B. Shnepp", Kazan, Russia

Abstract

The article describes the process of developing a number of unified compression stages of a centrifugal compressor used in the design of industrial multistage compressors with an inter-bearing arrangement of impellers based on the theory of similarity. The designed range is distinguished by a high bushing ratio and efficiency. The calculated and experimental results are presented. The developed series of the flow part is characterized by a wide range of applications in terms of consumption and conditional Mach numbers, as well as a high level of energy efficiency.

Keywords: centrifugal compressor stage, polytropic efficiency, optimization, CFD, Numeca Fine/Turbo, design

Анализ состояния центробежного компрессоростроения в России и за рубежом показал, что основным направлением его развития является увеличение

производительности и жесткости роторов, за счет внедрения высокоэффективных осерадиальных рабочих колес с высоким втулочным отношением. В АО «НИИтурбокомпрессор им.В.Б.Шнеппа» также ведутся работы по созданию унифицированного ряда проточной части с применением высокоэффективных ступеней сжатия с высоким втулочным отношением для ЦК с межопорным расположением рабочих колёс.

Предварительное проектирования позволило разбить диапазон применения разрабатываемого ряда ступеней на несколько областей применения ступеней по расходу. Работы по разработке ступеней ведутся в диапазоне условных коэффициентов расхода: для высокорасходных ступеней - $\Phi_0 \in [0,16...0,092]$; среднерасходных - $\Phi_0 \in [0,086...0,042]$; малорасходных - $\Phi_0 \in [0,04...0,015]$. Целевые уровни энергетической эффективности по ступеням промежуточного типа: для высокого расхода соответствуют $\eta_{пол} = 85...86\%$, среднерасходные ступени $\eta_{пол} = 86...87\%$, для малорасходного диапазона ступеней – не менее 80% КПД политропного. В качестве основного геометрического ограничения принят минимальный диаметр втулочного контура ступени $\overline{d_{ам}} = 0,4$.

По состоянию на 2024 год разработано четыре базовые лопаточные решетки рабочих колёс в диапазоне применения $\Phi_0 \in [0,16...0,046]$. Заполнение ряда происходит за счёт модификации базовых лопаточных решёток. Коэффициент дискретности ступеней сжатия ряда $k_{discr} \in [1,075...1,1]$. Проектное условное число Маха по входу в ступени $Mu_2 = 0,8$. Также, в условиях проектирования центробежных компрессоров для нужд производств СПГ разработан подряд ступеней для применения в составе корпусов сжатия для работы на смешанном хладагенте при $Mu_2 = 1,1$.

Проектные изыскания ведутся в программных комплексах Concept NREC Compal. Газодинамические расчёты в Numeca FINE/Turbo. Базовые лопаточные решетки разрабатываемых ступеней нового ряда подвергаются многопараметрической оптимизации в FineDesign3D/Minamo.

Подтверждение расчётных газодинамических характеристик происходит на экспериментальных стендах газодинамики АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа». Все вновь спроектированные ступени показывают высокий уровень эффективности, соответствующий целевым показателям.

На первых этапах разработана концепция, в рамках которой ряд разбивается на две секции, соответственно, кроме ступеней сжатия имеется две всасывающие камеры и нагнетательные улитки, оценивается дискретность ряда – степень перекрытия соседних характеристик ступеней.

Обширная исследовательская работа, частично изложенная в статьях [1-4] привела к формированию теоретического ряда ступеней, рисунок 1:

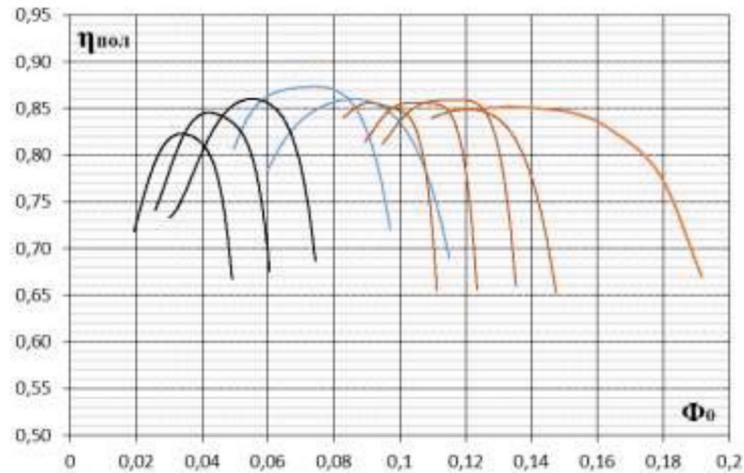
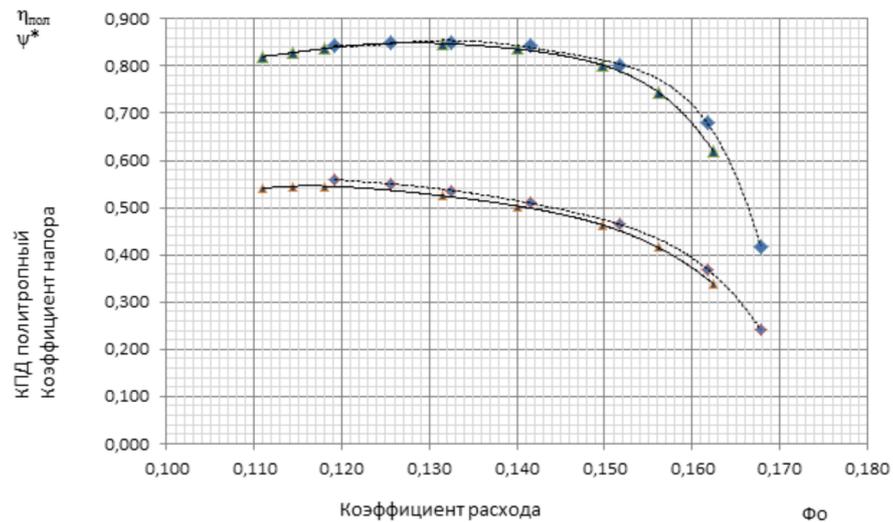


Рисунок 1 - Зависимость политропного КПД модельных ступеней безразмерного ряда от коэффициента расхода для ступеней промежуточного типа

Для достижения максимальной эффективности ряда применены различные типы статорных элементов – весь ряд перекрыт четырьмя типами лопаточных решеток.

На рисунке 2 приведен пример сравнения расчётной и экспериментальной характеристик на примере второй ступени ряда:



▲ – результаты экспериментального исследования;

◆ – результаты численного расчёта;

Рисунок 2 – Зависимость политропного КПД и коэффициента напора по заторможенным параметрам от коэффициента расхода по статическим параметрам для второй базовой ступени ряда. Условное число Маха 0,94.

Литература

1. Н.Г. Хасанов, Е.В. Дубинин, И.Ф. Хуснутдинов, А.Т. Лунев. Численное моделирование характеристик центробежных компрессоров и турбин в АО "НИИтурбокомпрессор им. В.Б.Шнеппа". Компрессорная техника и пневматика. 2023, №2, с 28-31
2. Е.В. Дубинин, Б.Ф. Идиятуллин, Н.Г. Хасанов. Оптимизация ступеней центробежных компрессоров. Омский научный вестник. серия авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023, т.7, №4 с. 33-39
3. 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.
4. А.М. Ахметзянов, Е.В. Дубинин, Н.Г. Хасанов, И.Ф. Хуснутдинов Проектирование базовых модельных ступеней центробежных компрессоров методами вычислительной гидродинамики. В сборнике: Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике. Сборник тезисов. 9-ая российская конференция. 2022. С. 256-260