

УДК 621.515.1

Е.С. БАРЫШЕВА

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ВЛИЯНИЕ РАДИАЛЬНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОТОКА НА ВХОДЕ В ЦЕНТРОБЕЖНУЮ СТУПЕНЬ НА ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*С помощью метода поверочного расчета и программного комплекса *АхСВт*, разработанных в Национальном аэрокосмическом университете «ХАИ», проведено численное исследование влияния входной радиальной неравномерности потока на газотермодинамические характеристики центробежных компрессорных ступеней. Рассмотрены различные варианты радиальной неравномерности полей полного давления на входе и их воздействие на структуру течения и суммарные характеристики двух центробежных ступеней. Показано, что наличие рассмотренной неравномерности приводит к существенному снижению параметров ступени, представлены количественные оценки.*

Ключевые слова: *центробежная ступень компрессора, входная радиальная неравномерность, метод расчета осесимметричного до- и трансзвукового течения, суммарные характеристики, структура течения.*

Введение

В процессе создания газотурбинной техники одним из наиболее трудоемких и дорогостоящих этапов является доводка, в процессе которой обеспечивается надежная совместная работа отдельных элементов двигателя в заданном диапазоне режимов.

В современных конструкциях ГТД и ГТУ достаточно широкое распространение получили осецентробежные компрессоры, для которых вопрос согласования работы осевых и центробежной ступеней (ЦБС) является одним из наиболее острых. Это вызвано тем, что проектирование и испытания каждой из частей, как правило, проводятся отдельно друг от друга. В реальных условиях работа центробежной ступени во многом зависит от параметров потока, вышедшего из осевых ступеней. В то же время при проектировании центробежной ступени влияние входной неравномерности обычно не учитывается. Окружная неравномерность, порождаемая впереди стоящими по потоку статорными лопатками предшествующих осевых ступеней, оказывает меньшее влияние на работу замыкающей центробежной ступени, в сравнении с радиальной неравномерностью. Радиальная неравномерность в многоступенчатом осецентробежном компрессоре может быть вызвана наличием пограничного слоя на торцевых поверхностях, отбором (перепуском) воздуха из проточной части осевых ступеней, а также особенностями их профилирования, что в свою очередь, существенно изменяет распределение параметров потока по высоте лопатки на входе в концевую ЦБС, сказываясь на ее работе.

© Е.С. Барышева, 2013

В статье приведены результаты расчетного исследования влияния входной радиальной неравномерности полного давления на суммарные характеристики центробежных ступеней.

1. Метод расчета

Для проведения работ использован разработанный в Проблемной научно-исследовательской лаборатории газотурбинных двигателей и установок Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» метод расчета и соответствующий программный комплекс *АхСВт* для расчета до- и трансзвукового течения в центробежных компрессорных ступенях различной напорности [1].

Данный метод позволяет определять структуру осредненного в окружном направлении трансзвукового течения и суммарные характеристики центробежных компрессорных ступеней с осерадиальными лопатками рабочих колес, учитывать влияние отбора рабочего тела из проточной части и поля параметров потока на входе.

В основе метода лежит решение системы уравнений Эйлера, записанной в стационарной форме с использованием представления о функции тока. Задача решается в обобщенной криволинейной системе координат. Дифференциальные уравнения для функции тока аппроксимируются конечно-разностными уравнениями второго порядка точности. Для учета проявления вязких эффектов используются обобщенные полуэмпирические зависимости для определения значений углов отставания потока в решетках профилей и коэффициентов потерь, соответствующие исследуемому диапазону скоростей течения.

Особенностями используемого численного метода являются использование разностных схем, обеспечивающих второй порядок точности, достаточно подробных расчетных сеток, позволяющих детально описывать поверхность лопаточных венцов и меридиональных обводов, а также проведение моделирования течения в межлопаточных каналах с учетом влияния отбора рабочего тела из проточной части ступени [1...3].

Проведена верификация ПК АхСВм на различных объектах и показана целесообразность его использования для численного моделирования трансзвуковых течений в центробежных компрессорных ступенях [2, 3].

В данной работе представлены результаты исследования влияния радиальной неравномерности полного давления на входе в центробежную ступень на ее суммарные характеристики и структуру течения в ней.

2. Проведение численных исследований

В качестве первого объекта исследования выбрана ЦБС, являющаяся заключительной в осецентрированном компрессоре.

Расчетные работы выполнялись в несколько этапов. Вначале рассмотрено влияние снижения полного давления в периферийной области на газотермодинамические характеристики выбранной ступени. На рис. 1 представлены распределения коэффициентов восстановления полного давления в равномерном (сплошная линия) и неравномерном (линия с маркерами)

потоке на входе в ступень. Как видно из данного рисунка, область пониженного давления занимает на периферии проточной части около трети ее высоты.

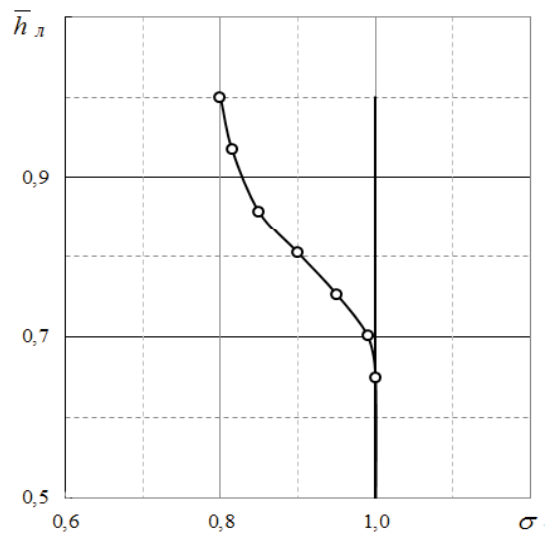


Рис. 1. Распределение коэффициента восстановления полного давления на входе в ступень

Расчетное исследование выполнено на трех частотах вращения. На рис. 2 представлены суммарные характеристики ступени для рассмотренных вариантов распределения коэффициентов восстановления полного давления. Из анализа полученных характеристик следует, что радиальная неравномерность полного давления в периферийной области входного сечения

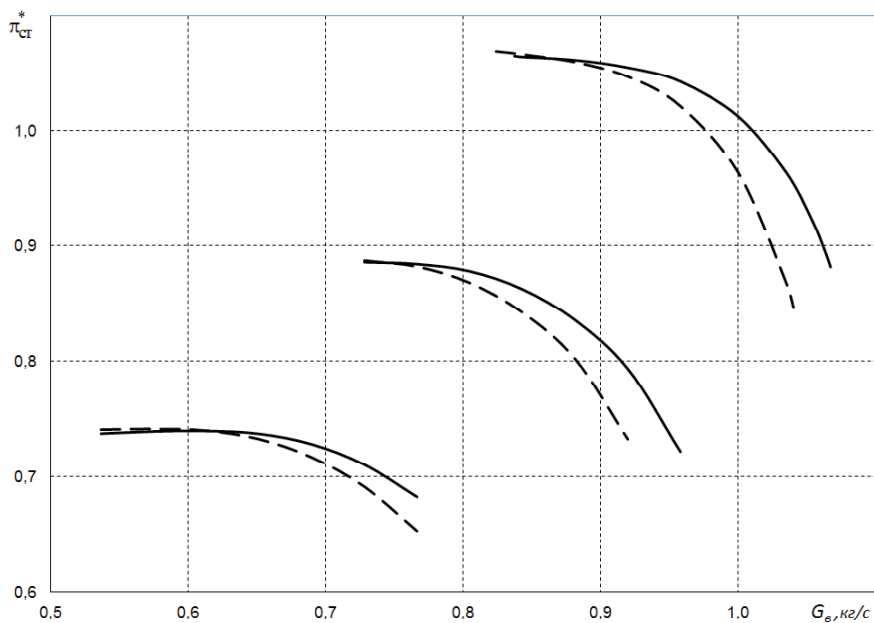


Рис. 2. Влияние неравномерности потока на периферии на суммарную характеристику центробежной ступени
 — — — — — равномерное поле параметров, —○— неравномерное поле параметров

приводит к смещению характеристики влево, в область меньших значений расхода. Это расхождение наглядно проявляется вблизи границы запираания. При этом запас устойчивости рассматриваемой ступени относительно рабочей точки характеристики в неравномерном потоке уменьшается. В «расчетной» точке по частоте вращения и расходу воздуха падение $\pi_{СТ}^*$ составило около 5%. На пониженных частотах вращения отрицательное влияние неравномерности потока на входе в ступень снижается. Такой характер влияния неравномерности на периферии качественно подтверждается данными экспериментальных исследований, приведенных в работе [4].

Рассмотренное распределение коэффициента восстановления полного давления (рис. 1) также использовано при моделировании течения и в следующем объекте исследования – высоконагруженной модельной ступени [5], в состав которой входит осерадиальное рабочее колесо с промежуточными лопатками. Твёрдотельная модель компрессора представлена на рис. 3. На «расчетном» режиме при частоте вращения $n = 50000$ об/мин и расходе рабочего тела $G_B = 2,55$ кг/с это колесо обеспечивает степень повышения давления $\pi_{РК}^* = 6,1$ и изэнтропический КПД $\eta_{РК}^* = 0,84$.

На рис. 4 представлены полученные суммарные характеристики РК этой ступени, которые подтверждают сделанный ранее вывод о характере влияния радиальной неравномерности в периферийной области на входе в центробежную ступень. На данном рисунке

приведены расчетные характеристики с равномерным (сплошная линия) и неравномерным (линия с маркером) входным полем давлений. Маркерами обозначена характеристика, полученная экспериментальным путем [5]. Следует отметить, что принятая неравномерность привела к уменьшению рабочего диапазона данного РК по расходу более чем в два раза.

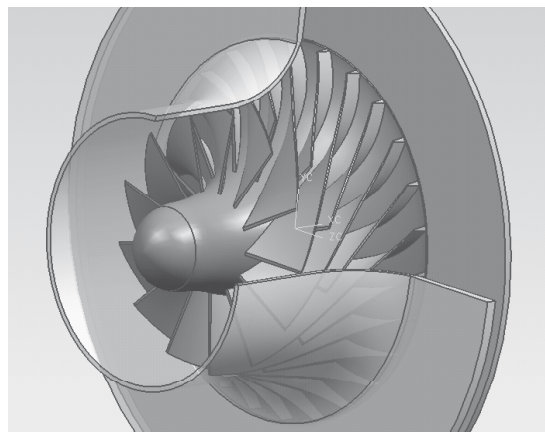


Рис. 3. Пространственная модель исследуемого компрессора

Структура течения в рабочем колесе на «расчетном» режиме при наличии неравномерности также существенно изменилась. На рис. 5 представлены изолинии чисел Маха в этом РК на режимах с равной степенью повышения полного давления $\pi_{РК}^* = 6,0$. Отмечается увеличение уровня скоростей и размеров сверхзвуковых зон в периферийной области как основных, так и промежуточных лопаток.

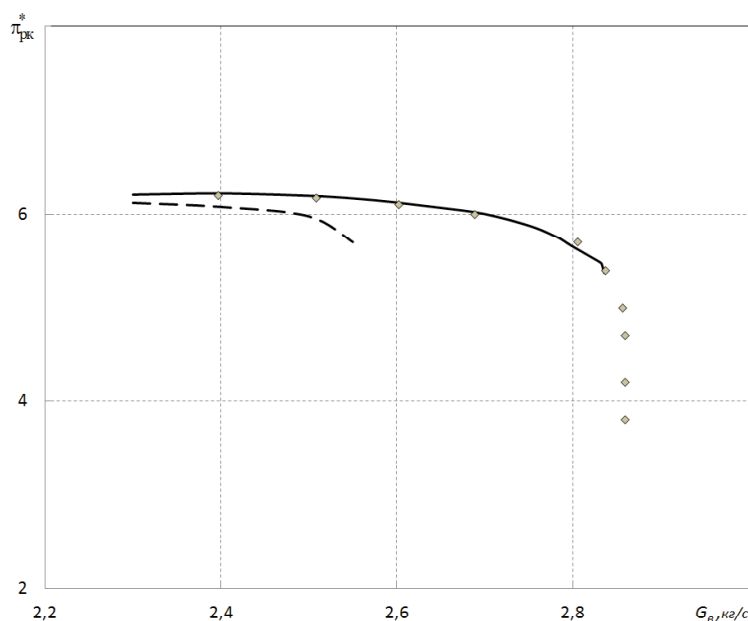
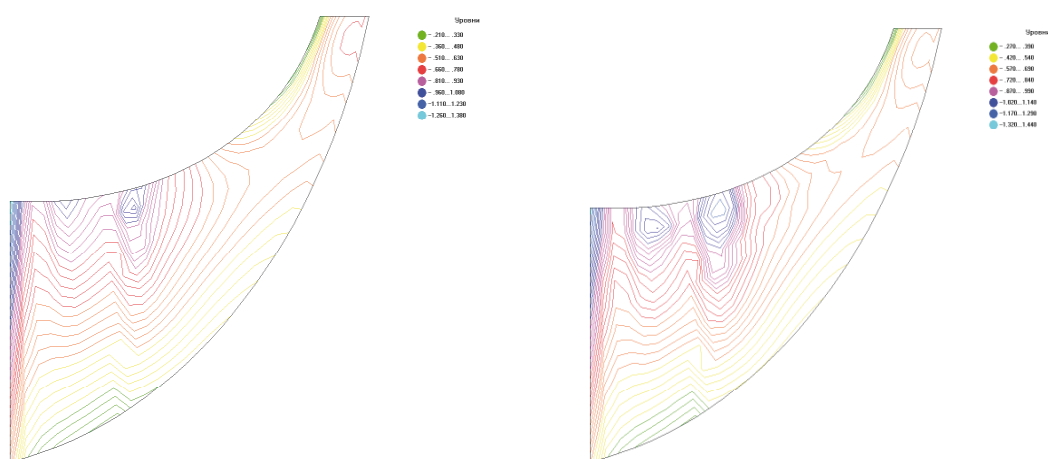


Рис. 4. Суммарная характеристика центробежного рабочего колеса

◆ – эксперимент,
 расчет: — — — — — равномерное поле параметров, —○— — — — — неравномерное поле параметров



а) равномерный вход

б) неравномерный вход

Рис. 5. Изолинии чисел Маха в рабочем колесе на режимах с $\pi_{pK}^* = 6,0$ с различными условиями на входе

Это, в свою очередь, приводит к возрастанию волновых потерь, заклиниванию межлопаточных каналов и, соответственно, к снижению расхода через рабочее колесо. Как видно из рис. 5, большая часть изменений в структуре течения сосредоточена в зоне воздействия неравномерности – в периферийной области. Вблизи втулки влияние неравномерности на периферии мало.

Кроме неравномерности потока, действующей в периферийной области, проведено расчетное исследование с одновременными «завалами» полного давления на втулке и периферии. Форма распределения коэффициента восстановления полного давления представлена на рис. 6. В качестве объекта исследования использована рассмотренная выше концевая ступень осесреднего компрессора.

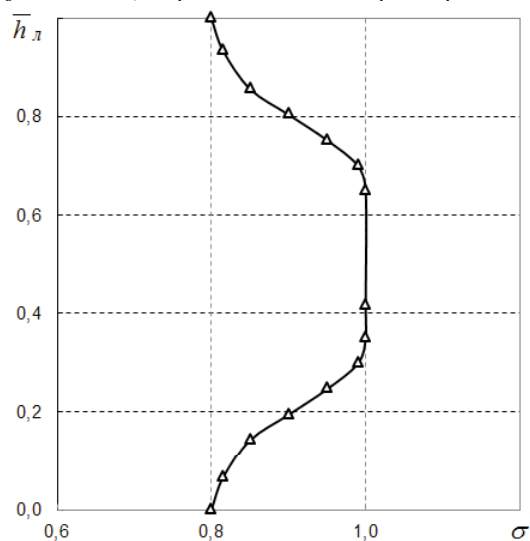


Рис. 6. Распределение коэффициента восстановления полного давления на входе в ступень

Численные исследования проведены для частоты вращения $\bar{n} = 1$. На рис. 7 представлено сопоставление напорных характеристик данной ступени при наличии неравномерности потока на втулке.

Как видно из рисунка, наличие зон пониженного давления на втулке приводит к дальнейшему снижению степени повышения полного давления и смещению характеристики в сторону меньших расходов.

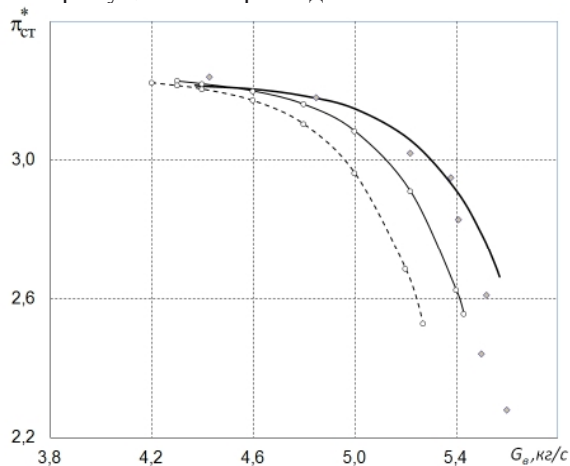


Рис. 7. Суммарная характеристика центробежной ступени при различных условиях на входе:

- — равномерный вход,
- — неравномерность на периферии,
- — неравномерность на втулке и периферии

Заключение

В статье представлены результаты расчетных исследований влияния радиальной неравномерности на входе в центробежную ступень. Показано, что данный метод расчета и соответствующий программный комплекс *AxCbM* позволяет проводить численное моделирование осесимметричного течения с учетом радиальной

неравномерности полного давления на входе в центробежную ступень компрессора и получать ее газотермодинамические характеристики.

Проведенные исследования также продемонстрировали, что для концевой центробежной ступени, являющейся составной частью осецентрированного компрессора, наличие неравномерности может привести к снижению степени повышения полного давления, запаса устойчивой работы, а также сокращению рабочего диапазона по расходу.

Таким образом, при проектировании осецентрированных компрессоров, необходимо учитывать реальные условия обтекания концевой центробежной ступени, особенно если она спроектирована под равномерное поле потока на входе, т.к. это может привести к ухудшению параметров двигателя.

Литература

1. Барышева Е.С. Метод расчета течения в центробежных компрессорах с осерадiallyми пространственными лопатками [Текст] / Е.С. Барышева, Л.Г. Бойко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007.- №.1(37) – С.45-51.
2. Бойко Л.Г. Исследование структуры течения и суммарных характеристик центро-

бежной компрессорной ступени с осерадiallyми лопатками [Текст] / Л.Г. Бойко, Е.С. Барышева // *Тяжелое машиностроение – Науч.-техн.и производ. журн.* – 2010.- №.3 – С.6-10.

3. Бойко Л.Г. Исследование трансзвукового течения в высоконапорном центробежном рабочем колесе [Текст] / Л.Г. Бойко, Е.С. Барышева // *Вестник двигателестроения*. – 2011.- №2 – С.203-207.

4. Развитие аэродинамики центробежных и комбинированных компрессоров и проблемы реализации их параметров в системе компрессорных узлов ГТД [Текст] / Милешин В.И., Иванов О.И., Русаков Ю.Н., Огарко Н.И., Ефимов А.В. // *Науч. вклад ЦИАМ в создание авиационных двигателей: в 2-х кн., кн.2.* – М.: Машиностроение, 2000. – С.138-144.

5. Eisenlohr G. Investigations of the Flow Through a High Pressure Ratio Centrifugal Impeller [text]/ G. Eisenlohr, H. Krain, F.-A.Richter, V.Tiede // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea and Air.* – (June 3-6, 2002). – Amsterdam, The Netherlands. (GT2002-30394). – 9 p.

Поступила в редакцию 27.05.2013

О.С. Барышева. Вплив радіальної нерівномірності течії на вході в відцентровий ступінь на її характеристики

За допомогою методу перевірного розрахунку і програмного комплексу AxCBm, що розроблені в Національному аерокосмічному університеті «ХАІ», проведено чисельне дослідження впливу вхідної радіальної нерівномірності течії на газотермодинамічні характеристики відцентрових компресорних ступенів. Розглянуті різні варіанти радіальної нерівномірності полів повного тиску на вході та їх вплив на структуру течії і сумарні характеристики двох відцентрових ступенів. Показано, що наявність розглянутої нерівномірності приводить до суттєвого зниження параметрів ступеня, наведена кількісна оцінка.

Ключові слова: відцентровий ступінь компресора, вхідна радіальна нерівномірність, метод розрахунку осьосиметричної до- і трансзвукової течії, сумарні характеристики, структура течії.

H. Barysheva. Inlet flow radial irregularity influence on centrifugal stage characteristics

Using the checking calculation method and software system AxCBm, developed in the National Aerospace University «KhAI», a numerical investigation of the inlet flow radial irregularity influence on centrifugal compressor stages gas-dynamic characteristics was carried out. Different variants of the inlet total pressure fields' radial irregularity and their influence on the flow structure and the overall characteristics of two centrifugal stages were considered. It was shown that the presence of considered irregularity significantly reduces the stage parameters level; quantitative estimates were provided.

Key words: compressor centrifugal stage, input radial irregularity, checking calculation method of axisymmetric sub- and transonic flow, flow structure.