

УДК 621.45: 533.6

Е.С. БАРЫШЕВА, Л.Г. БОЙКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина***МЕТОД РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРАХ С ОСЕРАДИАЛЬНЫМИ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ЛОПАТКАМИ**

Предложен усовершенствованный вариант метода поверочного расчета двумерного до- и трансзвукового течения в центробежном компрессоре, предназначенный для исследования осерадиальных ступеней с пространственным профилированием лопаток. Представлены результаты численного исследования течения в модельном центробежном компрессоре. Приведены суммарные характеристики и структура течения в рабочем колесе. Представлено сопоставление с результатами экспериментальных исследований и расчетов других авторов.

осесимметричное течение, центробежный компрессор, осерадиальное рабочее колесо, суммарные характеристики, структура течения, сопоставление с экспериментом

Введение

Осерадиальные центробежные компрессорные ступени находят широкое применение в авиационных газотурбинных двигателях, в агрегатах турбонаддува двигателей внутреннего сгорания, а также в стационарном компрессоростроении. По мере роста нагруженности ступеней растет уровень скоростей течения, достигая около- или сверхзвукового уровня. Экспериментальные методы исследования и доводки таких ступеней являются весьма энергоемкими и дорогостоящими. Существующие методы расчета различаются уровнями сложности. Для каждого этапа проектирования и доводки используются соответствующие методы моделирования течения: одномерного [1], двумерного [2], трехмерного [3, 4]. В комплексе они дополняют друг друга, обеспечивая наиболее полное и достоверное отображение картины течения. На этапе проектирования при выборе геометрических параметров для проведения многовариантных расчетов предпочтение отдается методам расчета в двумерной постановке.

Целью данной работы является построение усовершенствованного метода расчета, предназначенного для моделирования течения в ступени центробежного компрессора (ЦБК) с рабочими колесами

осерадиального типа с пространственным профилированием лопаток, а также его апробация.

1. Метод расчета

На основе подхода, представленного в [5], разработан усовершенствованный вариант метода поверочного расчета осесимметричного течения в центробежных ступенях, предназначенный для исследования компрессоров с осерадиальными проточными частями и пространственными лопатками на до- и трансзвуковых режимах работы.

В основу метода положено решение системы уравнений Эйлера в стационарной постановке:

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{w}) &= 0, \\ (\vec{w} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{w} + 2\vec{\omega} \times \vec{w} + \vec{\omega} \times \vec{u} + \frac{1}{\rho} \cdot \vec{\nabla} p &= 0, \\ \vec{\nabla} \cdot [\vec{w} \cdot (\rho E + p)] &= 0,\end{aligned}$$

где ρ – плотность;

\vec{w} – вектор относительной скорости;

\vec{u} – вектор окружной скорости;

p – давление;

$$E = c_v \cdot T + (w^2 - u^2) / 2,$$

T – температура;

c_v – теплоемкость при постоянном объеме.

Решение задачи ищется в обобщенной криволинейной системе координат (ξ, η, φ) (рис. 1).

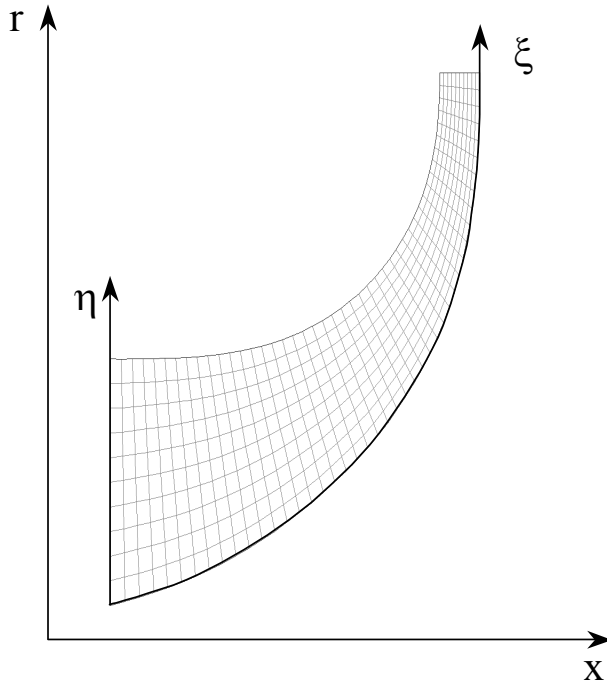


Рис. 1. Расчетная сетка

Использование представления о функции тока ψ позволяет, аналогично [5], свести систему к дифференциальному уравнению второго порядка, которое после ряда преобразований принимает вид:

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} - \frac{\partial Q}{\partial \xi} = U + P \cdot A_\eta - Q \cdot A_\xi, \quad (1)$$

где для областей, занятых лопаточными венцами:

$$P = \frac{1}{\rho \chi \sqrt{g}} \left(\gamma_{\xi\xi} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} - \gamma_{\xi\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right);$$

$$Q = \frac{1}{\rho \chi \sqrt{g}} \left(\gamma_{\xi\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} - \gamma_{\eta\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right);$$

$$A_\eta = \frac{1}{w^2} \left(\frac{\partial H}{\partial \eta} - T \frac{\partial S}{\partial \eta} \right);$$

$$A_\xi = \frac{1}{w^2} \left(\frac{\partial H}{\partial \xi} - T \frac{\partial S}{\partial \xi} \right);$$

$$U = 2u \cdot \left(n_\eta \frac{\partial r}{\partial \xi} - n_\xi \frac{\partial r}{\partial \eta} \right);$$

$$\gamma_{\xi\xi} = g_{\xi\xi} + r^2 \cdot n_\xi^2;$$

$$\gamma_{\eta\eta} = g_{\eta\eta} + r^2 \cdot n_\eta^2;$$

$$\gamma_{\xi\eta} = g_{\xi\eta} + r^2 \cdot n_\xi \cdot n_\eta.$$

Для свободных каналов:

$$P = \frac{1}{\rho \chi \sqrt{g}} \left(g_{\xi\xi} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} - g_{\xi\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right);$$

$$Q = \frac{1}{\rho \chi \sqrt{g}} \left(g_{\xi\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} - g_{\eta\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right);$$

$$A_\eta = \frac{1}{v_m^2} \cdot \left(\frac{\partial H}{\partial \eta} - T \cdot \frac{\partial S}{\partial \eta} - \frac{\Gamma}{r^2} \cdot \frac{\partial \Gamma}{\partial \eta} \right);$$

$$A_\xi = \frac{1}{v_m^2} \cdot \left(\frac{\partial H}{\partial \xi} - T \cdot \frac{\partial S}{\partial \xi} - \frac{\Gamma}{r^2} \cdot \frac{\partial \Gamma}{\partial \xi} \right);$$

$$U = 0,$$

где χ – коэффициент загромождения проточной части лопаточными венцами;

g – определитель метрического тензора;

H – ротальпия;

Γ – циркуляция;

S – энтропия;

r – радиус;

V_m – проекция абсолютной скорости на меридиональную плоскость;

n_ξ, n_η – проекции вектора нормали к средней межлопаточной поверхности S_2 , введенной аналогично [6], на оси ξ, η .

С помощью девятиточечного шаблона это дифференциальное уравнение аппроксимируется конечно-разностными уравнениями второго порядка точности:

$$P_{i,j+1/2} - P_{i,j-1/2} - h \cdot (P \cdot A_\eta)_{i,j} - Q_{i+1/2,j} + Q_{i-1/2,j} + h \cdot (Q \cdot A_\xi)_{i,j} = h \cdot U_{i,j}.$$

Для решения полученной системы уравнений используется метод Зейделя.

Решение уравнения (1) на околосвуковых режимах затруднено тем, что плотность является неоднозначной функцией расхода.

В предлагаемом подходе эта неоднозначность преодолевается путем использования проекции уравнения движения в форме Крокко на вектор относительной скорости, что позволяет расширить область применения метода.

В этом случае уравнение для определения плотности принимает вид:

$$w^\xi \frac{\partial \rho}{\partial \xi} + w^\eta \frac{\partial \rho}{\partial \eta} = \rho \cdot F,$$

где $F = \frac{1}{k-1} \cdot \frac{1}{I} \left(w^\xi \frac{\partial I}{\partial \xi} + w^\eta \frac{\partial I}{\partial \eta} \right);$

I – энтальпия;

k – показатель изэнтропы.

Для численного интегрирования полученного уравнения применена неявная одношаговая схема. Полученная система уравнений решается методом прогонки.

Для обеспечения устойчивости счета при переходе через звуковую линию в предлагаемом методе аналогично работам [7, 8] использовано представление об искусственной сжимаемости.

Тогда выражение для коррекции плотности имеет вид:

$$\tilde{\rho} = \rho - \mu \frac{\partial \rho}{\partial s} \Delta s,$$

$$\mu = \max \left[0, C_\mu \cdot \left(1 - 1/M^2 \right) \right],$$

$$C_\mu = 1 \dots 2,$$

где s – направление вдоль линии тока.

Вязкие свойства потока учитываются косвенно, в уравнение движения аналогично [9] вводится дополнительный член, который имитирует воздействие диссипативных сил на течение.

Для расчета обтекания осерадиальных пространственных лопаток на до- и транзвуковых режимах работы в алгоритм метода введены обобщенные полуэмпирические зависимости для учета потерь, включая волновые, и углов отставания, отличные от использовавшихся в [5].

Сложная пространственная геометрия лопаток рабочих колес требует детального описания их поверхностей для определения срединной межлопаточной поверхности, проекций вектора нормали на координатные оси, толщин лопаток в окружном направлении и других параметров лопаточных венцов.

Для этого разработан соответствующий алгоритм подготовки и задания геометрических параметров лопаточных венцов и проточной части.

В предложенном алгоритме лопатка центробежного РК полностью является описанной при задании: обводов проточной части в меридиональной плоскости; распределения геометрического угла лопатки β_d ; распределения угловой координаты φ в цилиндрической системе координат; распределения толщины лопаток в окружном направлении по срединной поверхности лопатки.

Необходимые для расчета геометрические параметры пера лопатки, в зависимости от способа ее задания, в данном методе можно получить либо из конструкторской документации, если заданы их распределения вдоль втулочной и периферийной поверхностей; либо с помощью твердотельного моделирования лопатки, если ее поверхность задана координатами профилей.

В отличие от разработанных ранее и ставших классическими методов [6, 10, 11], предложенный метод базируется на конечно-разностных схемах повышенной точности, позволяет детально описывать поверхности лопаток с помощью достаточно мелких расчетных сеток, дополнен полуэмпирическими обобщенными зависимостями для учета потерь и углов отставания. Данный метод позволяет получать поля параметров в любой точке проточной части, а также суммарные характеристики ступени и ее элементов. В свете этого он может быть отнесен к новому поколению методов расчета двумерных течений, которые применяются как в процессе проектирования для выбора рациональных конструктивных решений, так и для поверочного расчета на этапах доводки.

2. Апробация метода расчета

Предложенный выше алгоритм реализован в соответствующем программном комплексе (ПК) АхСВм. Апробация модернизированного ПК проведена в несколько этапов.

Модельная ступень 1. На примере модельной ступени 1 (рис. 2), состоящей из рабочего колеса (РК), лопаточного диффузора (ЛД) и обратного направляющего аппарата (ОНА), исследовано влияние искусственной сжимаемости на суммарные характеристики ступени, представленные в виде зависимости политропических напора ψ_n^* и КПД η_n^* по полным параметрам от условного коэффициента расхода Φ_0 , на двух частотах вращения ($M_{u2}=0,8$ и $M_{u2}=0,92$, рис. 3). Выполненные расчеты показывают, что введение искусственной сжимаемости позволяет моделировать течение в ступени в трансзвуковом диапазоне режимов обтекания, а также ока-

зывается необходимым в процессе вычислений при высоких дозвуковых скоростях, так как расчет производится с помощью итераций, где величины скоростей могут достигать звуковых и более значений.

Расчет течения в модельной ступени 2. Аprobация метода расчета и комплекса программ проведена на тестовом низкоскоростном ЦБК с осерадальным колесом, диаметр на выходе из которого $D_2 = 1,524$ м. Расчет проводился при стандартных атмосферных условиях на входе, частота вращения $n=1862,4$ об/мин.

На рис. 4 представлена проточная часть ступени и ее трехмерная модель.

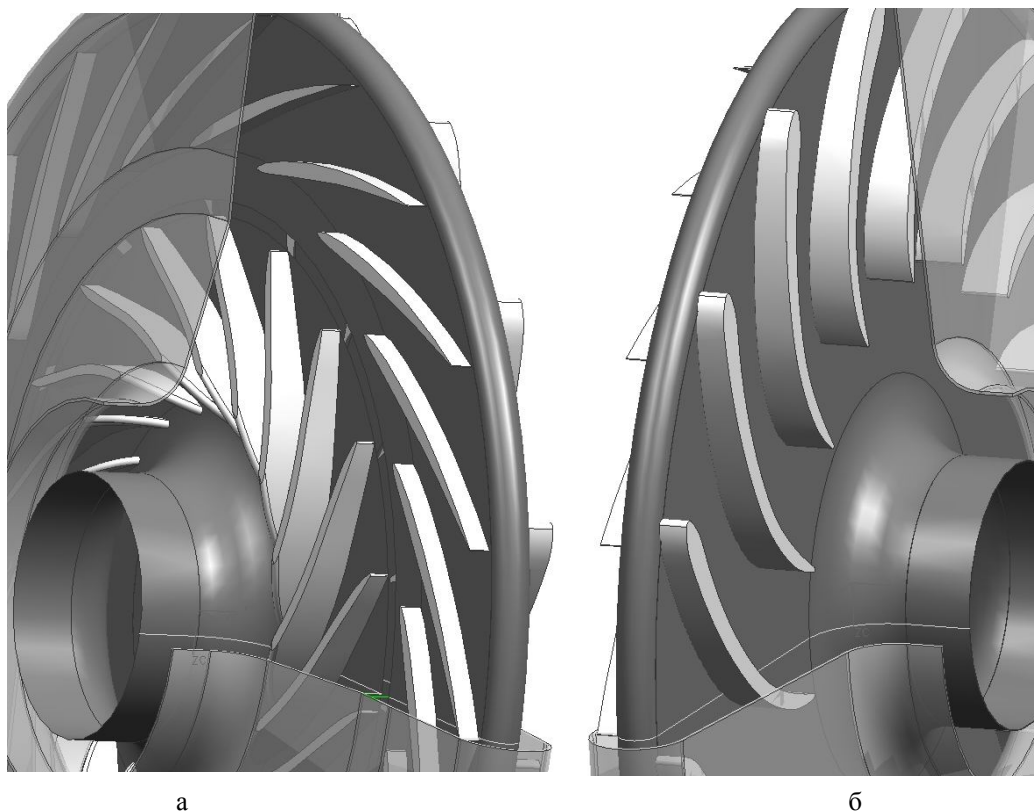


Рис. 2. Твердотельная модель центробежной ступени 1
а – РК и ЛД; б – ОНА

В результате моделирования течения получено удовлетворительное согласование расчетной и экспериментальной [12] суммарных характеристик рабочего колеса, построенных в виде зависимостей степени повышения полного давления π^* и КПД η^* от расхода G_0 , рис. 5. Там так же приведено сопос-

тавление с результатами расчетов других авторов [12].

Представленный подход позволяет рассмотреть структуру течения в любой точке проточной части ступени как в межлопаточных каналах, так и в свободных от лопаток областях течения.

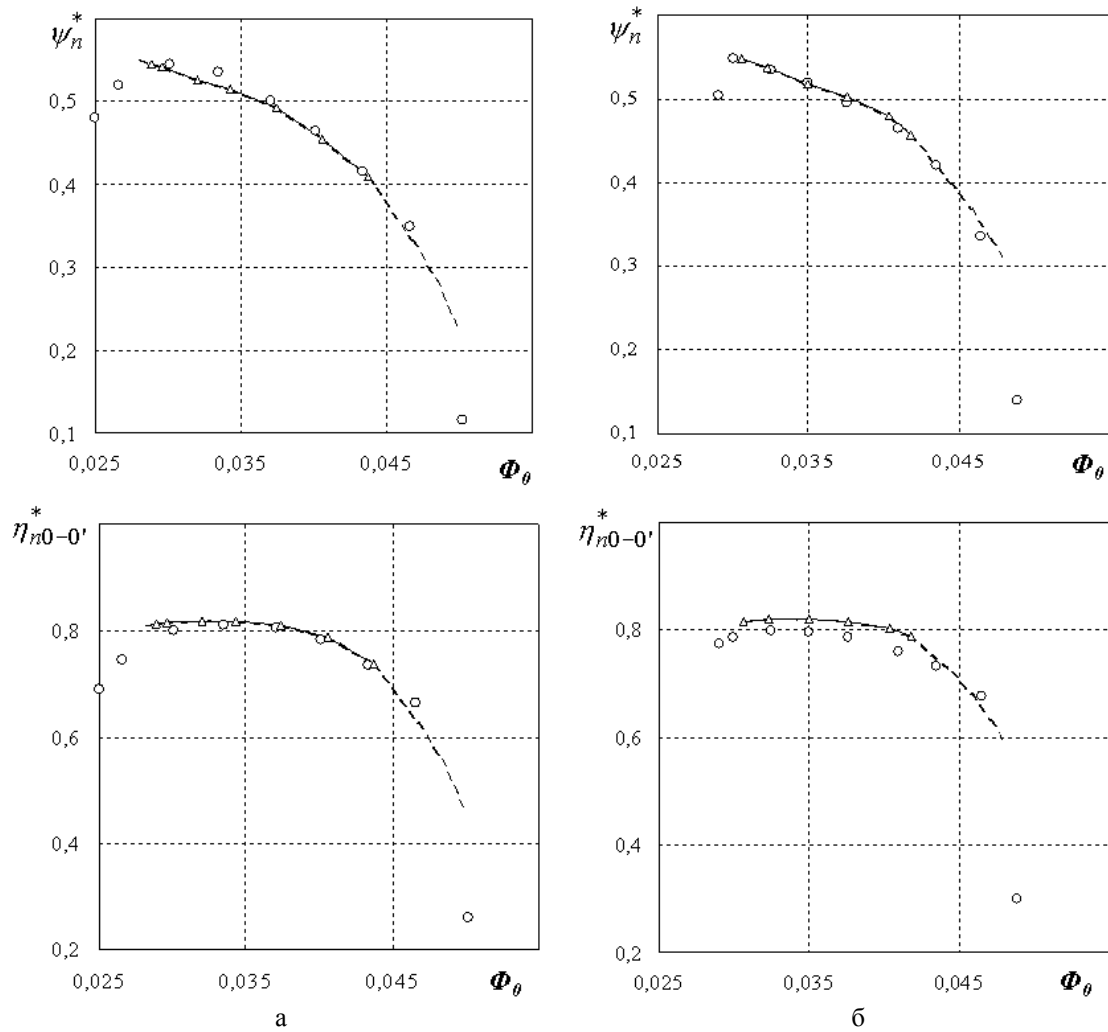


Рис. 3. Влияние искусственной сжимаемости:

а – $M_{u2} = 0,8$; б – $M_{u2} = 0,92$

- – эксперимент;
- △— расчет без учета искусственной сжимаемости;
- расчет с учетом искусственной сжимаемости

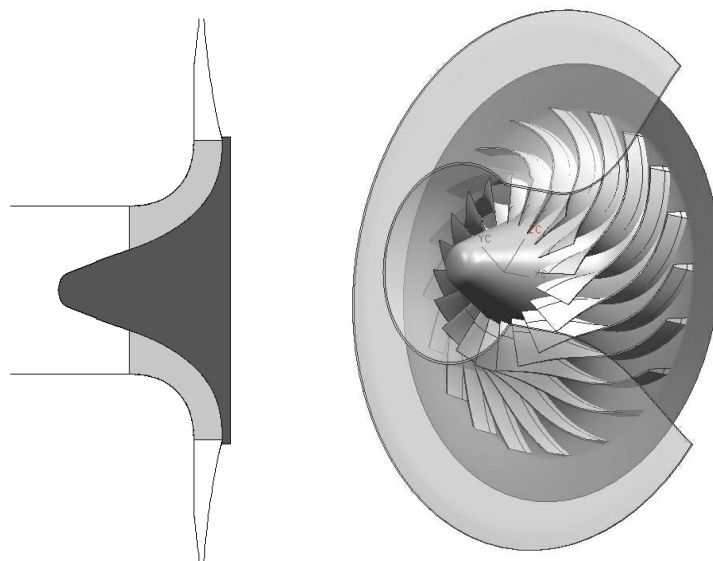


Рис. 4. Проточная часть и трехмерная модель тестовой ступени 2

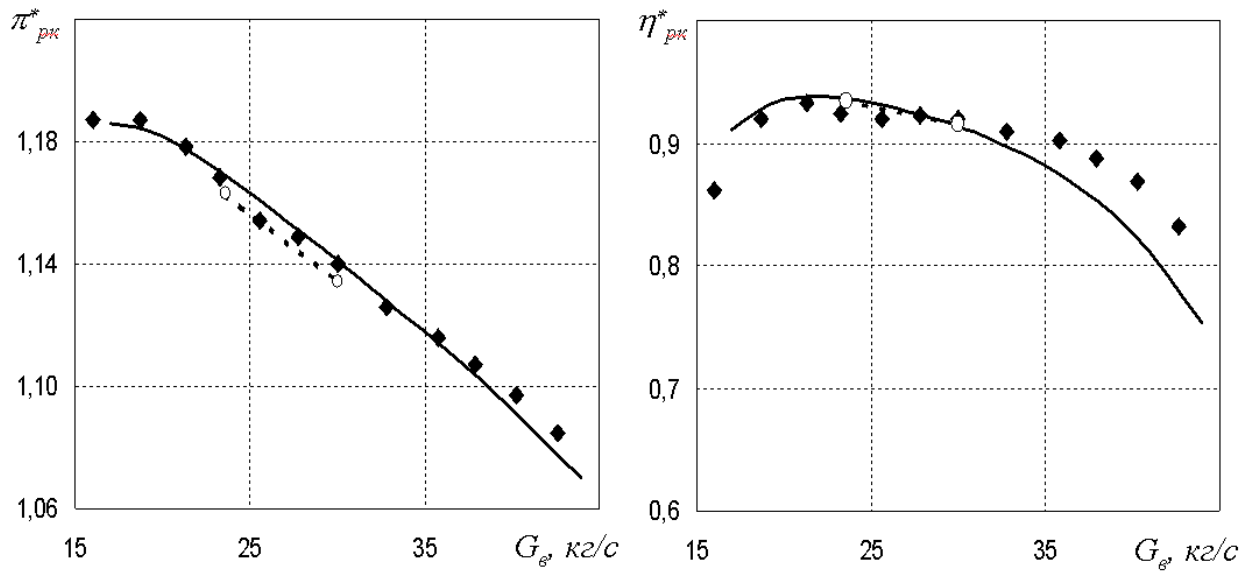


Рис. 5. Сопоставление характеристик РК тестовой ступени 2:

- ◆ — эксперимент;
- — расчет [12];
- — расчет по представленному методу

На рис. 6 представлены изолинии чисел Маха (в РК – число Маха в относительном движении, в каналах – в абсолютном) на расчетном режиме. Здесь наблюдается безударный вход на лопатки РК. На рис. 7 приведены распределения по высоте проточной части углов натекания i_l на входе в РК на двух режимах: расчетном и меньшем расчетного.

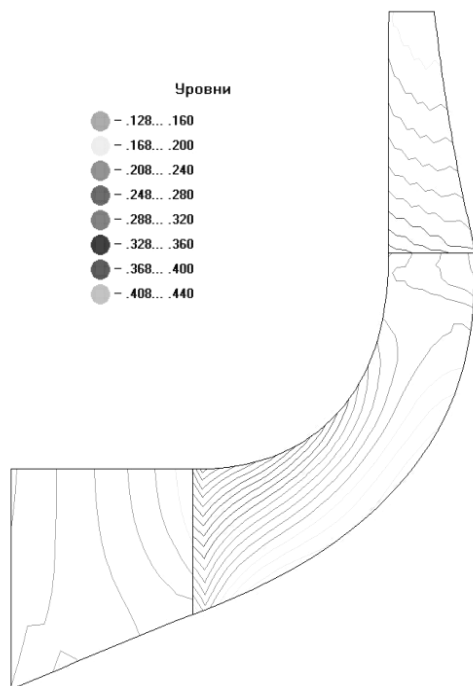


Рис. 6. Изолинии чисел Маха тестовой ступени на расчетном режиме

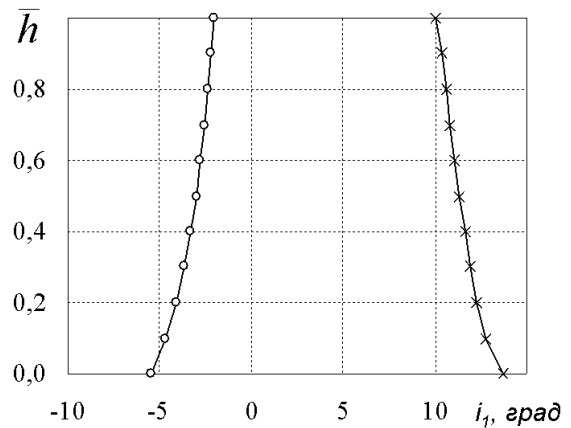


Рис. 7 Распределения углов натекания (а) на входе в РК:

- — расчетный режим, $G=30$ кг/с;
- ×--- — $G=17$ кг/с.

Заключение

Материалы, представленные в данной статье, а также другие результаты, полученные авторами в процессе апробации метода расчета, позволяют сделать вывод о работоспособности предложенного метода и о возможности его использования для численного исследования трансзвуковых течений в проточной части ступени центробежного компрессора с радиальными и осерadiальными про-

странственными лопатками в широком диапазоне режимов работы в процессе проектирования и доводки.

Литература

1. Анисимов С.А. Газодинамический расчет центробежных компрессоров поэлементным методом. – Л.: Машиностроение, 1974. – 136 с.

2. Галеркин Ю.Б. Экспериментальные исследования и развитие методов проектирования, основанных на анализе пространственного потока // Тр. науч. школы компрессоростроения СПб ГПУ. – СПб.: ГПУ, 2005. – С. 185-205.

3. Милешин В.И., Орехов И.К., Старцев А.Н. Метод проектирования и доводки осевых и центробежных компрессоров на основе расчета 3D вязкого течения в рамках уравнений Навье-Стокса и решения обратных задач газовой динамики в квазитрехмерной постановке // Научный вклад в создание авиационных двигателей. В 2-х кн. Кн.2. / Под ред. В.А. Скибина, В.И. Солонина. – М.: Машиностроение, 2000. – С. 144-159.

4. Ершов С.В., Русанов А.В. Численный метод расчета трехмерных вязких течений в осерадиальных турбомашинах // Проблемы машиностроения. – 1999. – Т. 2, № 1-2. – С. 27-33.

5. Метод поверочного расчета течения в проточной части центробежного компрессора и его апробация / Л.Г. Бойко, А.Е. Демин, Е.С. Барышева, К.В. Фесенко, Ю.С. Бухолдин, В.Н. Довженко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 2 (18) – С. 42-48.

6. Жуковский М.И. Аэродинамический расчет потока в осевых турбомашинах. – Л.: Машиностроение, 1967. – 287 с.

7. Хафез Лоувелл. Численное решение уравнения для функции тока в случае трансзвуковых скоростей // Аэрокосмическая техника. – 1983. – Т. 1, №11. – С. 63-73.

8. Сюй Ни Ду. Численное решение уравнения для функции тока в трансзвуковых течениях // Энергетич. машины и установки. – 1988. – № 4. – С. 34-38.

9. Численное исследование двумерного течения в проточной части ступени центробежного нагнетателя / Л.Г. Бойко, Е.С. Барышева, К.В. Фесенко, Ю.С. Бухолдин, В.Н. Довженко // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 3. – С. 8-13.

10. Сальников В.С. Метод расчета течения газа и несжимаемой жидкости в турбомашинах с помощью ЭЦВМ. – М.: ЦИАМ, 1967, техн. отчет № 294. – 32 с.

11. Дорфман Л.А. Численные методы в газодинамике турбомашин. – Л.: Энергия, 1979. – 270 с.

12. Chriss R.M. Experimental and Computational Results From the NASA Lewis Low-Speed Centrifugal Impeller at Design and Part-Flow Conditions / R.M. Chriss, M.D. Hathaway, J.R. Wood // ASME Journal of Turbomachinery. – 1996. – Vol. 118. – P. 55-65.

Поступила в редакцию 9.01.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Амброжевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.