

УДК 621.45.037

Л. Г. БОЙКО<sup>1</sup>, А. Е. ДЁМИН<sup>1</sup>, Ю. П. МАКСИМОВ<sup>1</sup>,  
Ю. Ф. АХТЕМЕНКО<sup>2</sup>, В. А. КАЛЮЖНАЯ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", Украина*

<sup>2</sup> *ГП "Ивченко-Прогресс", Украина*

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ И СУММАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА ГТД

*В статье приведены результаты численного исследования осесимметричного дозвукового течения в многоступенчатом осевом компрессоре газотурбинного двигателя в широком диапазоне рабочих режимов без перепуска воздуха из проточной части. Представлены суммарные характеристики компрессора на различных частотах вращения в сопоставлении с экспериментальными данными. Рассмотрена структура течения на трех режимах по расходу при заданной частоте вращения. Показано изменение углов натекания и параметра диффузорности по ступеням компрессора в рассмотренном диапазоне частот вращения.*

**Ключевые слова:** *осевой многоступенчатый компрессор, расчетные режимы работы, структура течения, суммарные характеристики.*

### Введение

В процессе эксплуатации газотурбинного двигателя (ГТД) режимы его работы изменяются в достаточно широком диапазоне по частоте вращения и по расходу. Многоступенчатый осевой компрессор (МОК) обеспечивает работу двигателя на всех допустимых режимах, определяемых условиями совместной работы узлов газогенератора.

Необходимость выполнения поверочных газодинамических расчетов возникает в процессе проектирования и доводки собственно компрессора, а также системы регулирования. Поверочные расчеты позволяют определять параметры течения и суммарные характеристики компрессора в целом, его отдельных ступеней, а также анализировать совместную работу ступеней в МОК. Используемые методы расчета могут иметь различный уровень сложности: от методов, предназначенных для расчетов в одномерной постановке по среднemasсовым параметрам, до методов, позволяющих анализировать вязкое пространственное течение. В зависимости от решаемых задач выбирают и применяют соответствующие методы. Большой объем расчетных работ при проектировании производится с помощью 2D подходов, имеющих достаточные для практики быстроедействие, что особенно важно при необходимости рассчитывать характеристики компрессора, и точность. При выборе программного продукта предпочтение отдается доведенным и верифицированным пакетам.

Широкую известность получили квазитрёхмерные и двумерные подходы, разработанные за рубежом и представленные в [1...7], а также методы, разработанные в СССР, [8...11]. В настоящее время в странах СНГ разработкой новых и совершенствованием подобных подходов занимаются относительно небольшое количество организаций [12] в то же время 2D подходы активно используются при проектировании и составляют неотъемлемую часть специализированных программных комплексов (см. например, Concepts NREC и др.).

В проблемной научно-исследовательской лаборатории газотурбинных двигателей и установок Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского "ХАИ" разработан комплекс программ, позволяющий анализировать в 2D постановке структуру течения и суммарные характеристики осевых и центробежных низко- и высоконапорных ступеней, а также многоступенчатых компрессоров с учётом отбора (перепуска) воздуха из проточной части, а также решеток профилей [13, 14].

В процессе совместных работ с ГП "Ивченко Прогресс", ПАО "Мотор Сич" по исследованию течений в многоступенчатых осевых компрессорах ГТД различного назначения и их совершенствованию проведена верификация элементов программного комплекса.

В статье представлены результаты исследования структуры течения и суммарных характеристик многоступенчатого осевого компрессора современного ГТД на режимах без перепуска воздуха.

### Исследование течения в многоступенчатом осевом компрессоре

При выполнении данного расчетного исследования использован программный комплекс AxSym [13], позволяющий проводить численное моделирование течений в многоступенчатых осевых компрессорах и их элементах при до-, транс- и сверхзвуковых ( $M < 1,4$ ) скоростях осредненного в окружном направлении потока. В его основу положено решение системы уравнений Эйлера с использованием конечно – разностного метода второго порядка точности и обобщенных характеристик решёток и ступеней для учета проявления вязких эффектов [15].

Система уравнений Эйлера записана для вращающейся с постоянной угловой скоростью  $\omega$  системы координат:

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

где  $\vec{\nabla}$  – дифференциальный оператор Гамильтона,  $\rho$  – плотность,  $\vec{w}$  – вектор относительной скорости,  $\vec{\omega}$  – вектор угловой скорости вращения ротора,  $\vec{u}$  – вектор окружной скорости,  $p$  – давление, удельная полная энергия  $E = c_v T + \frac{w^2 - u^2}{2}$ ,  $T$  – температура,  $c_v$  – теплоемкость при постоянном объеме.

Для замыкания системы использовано уравнение состояния совершенного газа

$$p = \rho R T.$$

Осреднение полученных в расчёте параметров потока на разных радиусах выполнено с использованием законов сохранения массы, импульса и энтропии в осредненном и осредняемом потоках, что позволяет получить интегральные значения параметров потока за венцами, ступенями и компрессором в целом.

В процессе расчета проточная часть (рис. 1 а) разбивается достаточно мелкой сеткой, которая отображается на прямоугольник (показана укрупненно на рис. 1 б), что позволяет описывать течение в проточных частях произвольной формы, достаточно точно моделировать поверхности лопаток рабочих колес (РК) и направляющих аппаратов (НА), определять структуру потока в межлопаточных каналах, получать изолинии параметров течения.

В качестве исходных данных задаются геометрические параметры проточной части и лопаточных венцов в различных сечениях по высоте лопатки (геометрические углы входа и выхода, углы установки, величина и положение максимальной толщины профиля, форма средней линии, а также величина выноса оси лопатки в осевом и радиальном направлениях).

В качестве исходных данных задаются геометрические параметры проточной части и лопаточных венцов в различных сечениях по высоте лопатки (геометрические углы входа и выхода, углы установки, величина и положение максимальной толщины профиля, форма средней линии, а также величина выноса оси лопатки в осевом и радиальном направлениях и др.), режимные параметры (расход, частота вращения), распределения по радиусу параметров потока на входе в расчетную область ( $P_n^*$ ,  $T_n^*$ ,  $\alpha$  – угол закрутки потока в абсолютном движении). Геометрические параметры лопаточных венцов, заданные в исходных данных, пересчитываются для всех узлов расчётной сетки. Использование ПК AxSym позволяет не только анализировать структуру течения и суммарные характеристики, но и проводить совершенствование геометрических параметров лопаточных венцов и проточной части с целью повышения КПД, расширения области устойчивой работы компрессора и т.д.

Ниже представлены результаты численного анализа течения в компрессоре авиационного ГТД. Компрессор состоит из 6 ступеней с нерегулируемыми направляющими аппаратами. На рис.2 приведено схематическое изображение проточной части. Первые три рабочих колеса имеют околосвуковое профилирование. Настройка и фиксация положения входного направляющего аппарата осуществляется в стендовых условиях на предприятии – изготовителе.

На рис. 3 показаны суммарные характеристики компрессора на различных частотах вращения без перепуска воздуха, полученные расчетным путем. Там же представлены экспериментальные данные, полученные в ГП "Ивченко Прогресс". Характеристики приведены к стандартным атмосферным условиям на входе и представлены в безразмерном виде

$$\pi_k^* = \frac{\pi_k^*}{\pi_k^* \text{ расчёт}}, \quad \eta_k^* = \frac{\eta_k^*}{\eta_k^* \text{ расчёт}}, \quad \bar{G}_B = \frac{G_B}{G_B \text{ расчёт}}.$$

Штриховой линией показана экспериментальная граница области устойчивой работы (ГУР). Штрих пунктирной – линия рабочих режимов (ЛРР).

На рис. 4 показано изменение углов натекания на лопатки рабочих колес и направляющих аппаратов ступеней компрессора на трёх режимах по расходу при  $\bar{n}=1,0$  (т.т. 1, 2 и 3 на рис. 3). Из рисунка следует, что с увеличением расхода углы натекания

уменьшаются и на последних ступенях компрессора достигают значительных отрицательных величин, что при дальнейшем увеличении расхода может приводить к "запиранию" межлопаточных каналов.

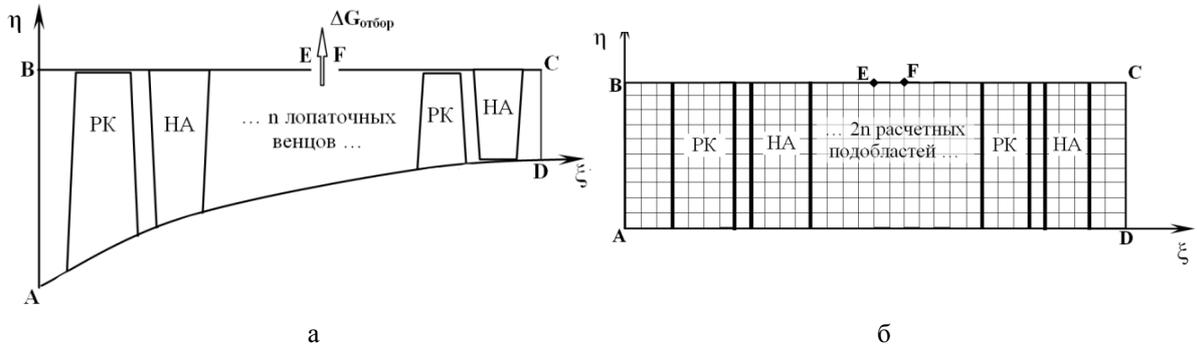


Рис. 1. Схема проточной части многоступенчатого осевого компрессора

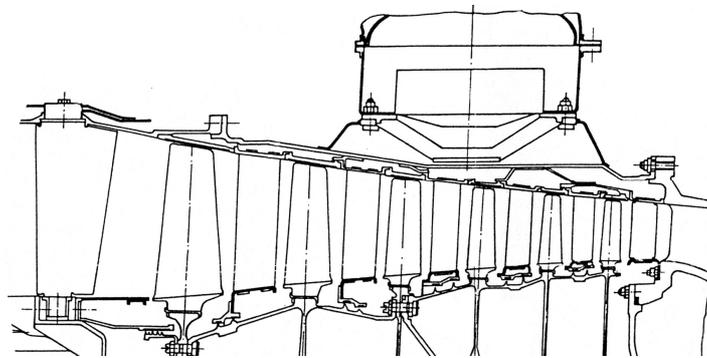


Рис. 2. Многоступенчатый осевой компрессор авиационного газотурбинного двигателя

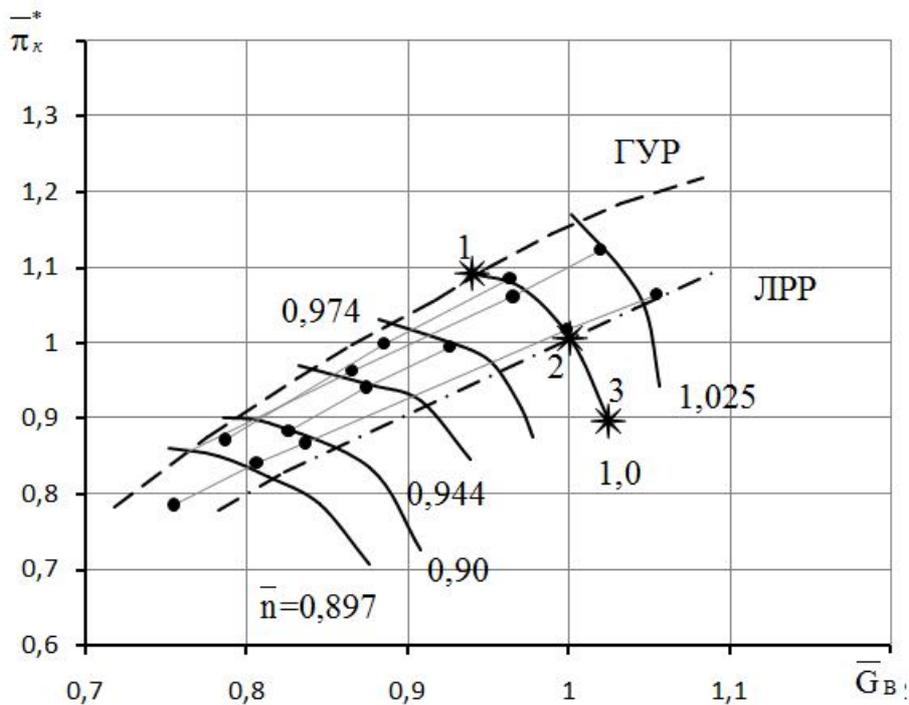


Рис. 3. Суммарная характеристика многоступенчатого осевого компрессора:  
 ● — экспериментальные данные, — — — — — ЛРР,  
 - · - · - · - ГУР, — — — — — расчет AxSym

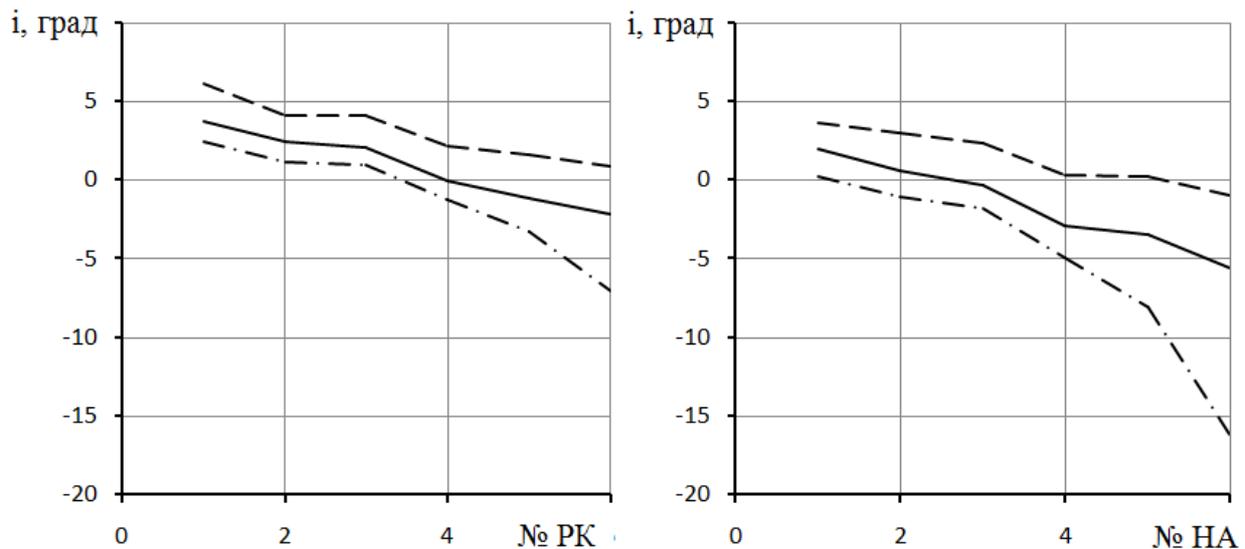


Рис. 4. Изменение угла натекания на лопатки РК и НА компрессора на среднем радиусе на различных режимах по расходу при  $\bar{n}=1,0$  (т.т.1, 2 и 3):  
 - - - - - т. 1, ————— т. 2, - · - · - т. 3

На рис. 5 показаны изолинии чисел Маха потока в относительном движении для РК ( $M_w$ ) и в абсолютном движении ( $M_c$ ) для остальных элементов проточной части, полученные при обработке результатов расчета параметров потока на "расчетной" частоте вращения ( $\bar{n}=1,0$  т.т.1, 2, 3 характеристики). Как видно из приведенных рисунков, в точке 1 во входной части лопаток первых трёх рабочих колёс имеют место высокие дозвуковые и околосзвуковые скорости осредненного в окружном направлении потока в относительном движении.

При увеличении расхода (скорости) в проточной части компрессора вблизи границы "запирания" в привтулочных областях последних ступеней начинается формирование зон повышенных скоростей, которые при дальнейшем увеличении расхода лимитируют расход воздуха через лопаточный венец. Более подробно это повышение скорости ("столбик" в РК и НА 6 ступени) показано в выноске на рис. 5.

На рис. 6 приведены распределения углов натекания на лопаточные венцы компрессора на среднем радиусе на режимах вблизи ГУР и ЛРР для двух частот вращения  $\bar{n}=1,0$  и  $\bar{n}=0,9$ . Здесь же показаны распределения степени диффузорности течения  $Deq$  на среднем радиусе на этих режимах.

Использование этого параметра в соответствии с предложенным в работе [10] подходом позволяют оценить порядок подхода к границе устойчивости различных лопаточных венцов многоступенчатого компрессора. Из приведенных результатов следует, что наиболее опасными с точки зрения возникновения

срыва для рассмотренных частот вращения являются лопаточные венцы двух первых ступеней.

На рис. 7 показаны распределения по радиусу приведенных значений давления и температуры заторможенного потока в сечениях на входе в лопаточные венцы РК для т.т. 1 и 2, рис. 3 в виде зависимостей:

$$\begin{aligned} \bar{P}^* &= P^* / P_K^* = f(\bar{R}), \\ \bar{T}^* &= T^* / T_K^* = f(\bar{R}), \\ (\bar{R} &= R / R_H), \end{aligned}$$

где  $P_K^*$  – полное давление за компрессором,

$T_K^*$  – полная температура за компрессором,

$R_H$  – радиус периферийного сечения на входе в компрессор.

По результатам проведенного численного исследования определены запасы газодинамической устойчивости для режимов, соответствующих линии рабочих режимов, а также параметр, характеризующий диффузорность течения на среднем радиусе вблизи экспериментальной ГУР.

На рис. 8 приведена зависимость запаса устойчивости  $\Delta Ku$  от приведенной частоты вращения. Штриховой линией показан минимальный допустимый уровень запаса ГДУ, принятый для данного исследования.

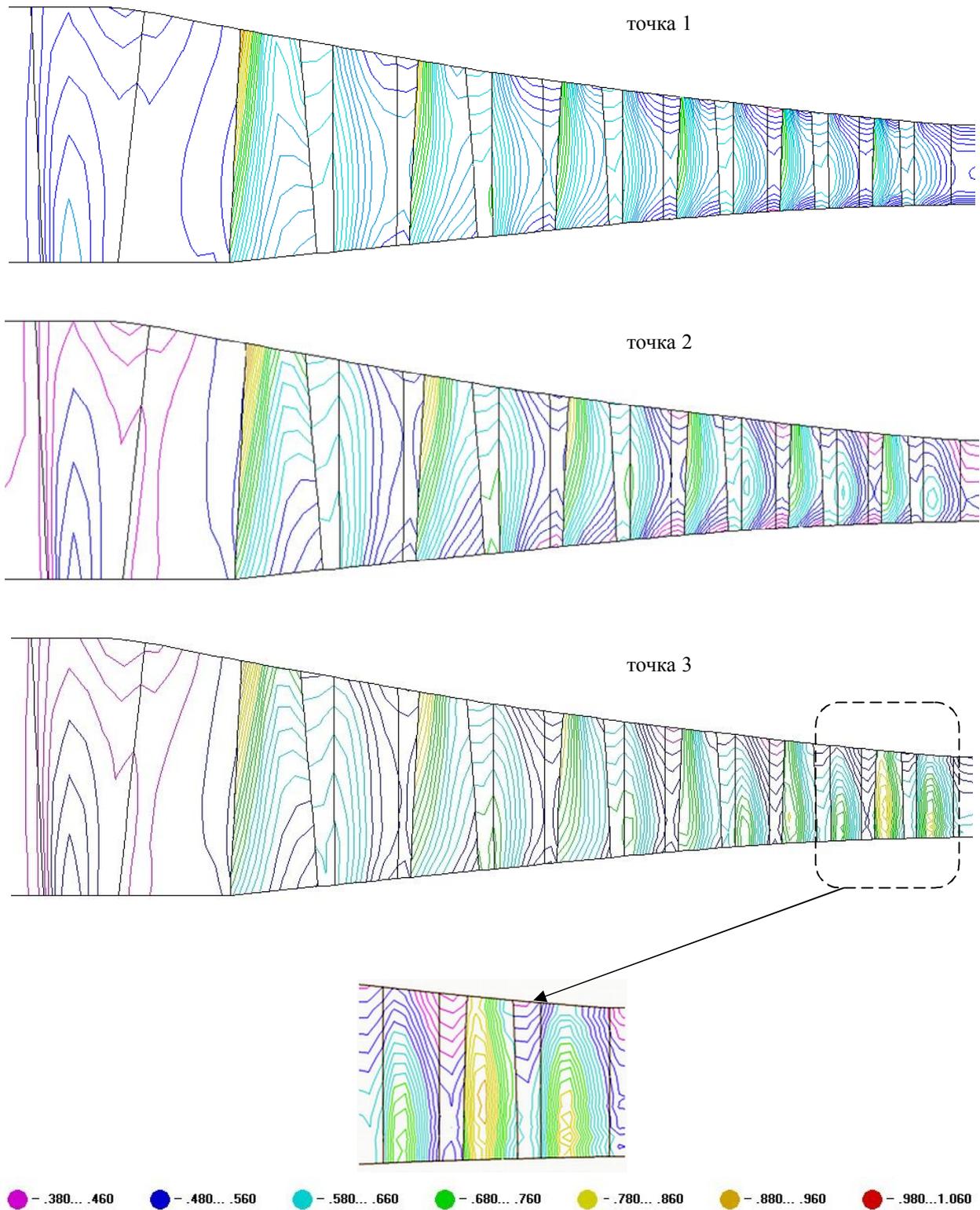


Рис. 5. Изолинии чисел Маха в компрессоре при  $\bar{n}=1,0$  (т.т. 1, 2 и 3)

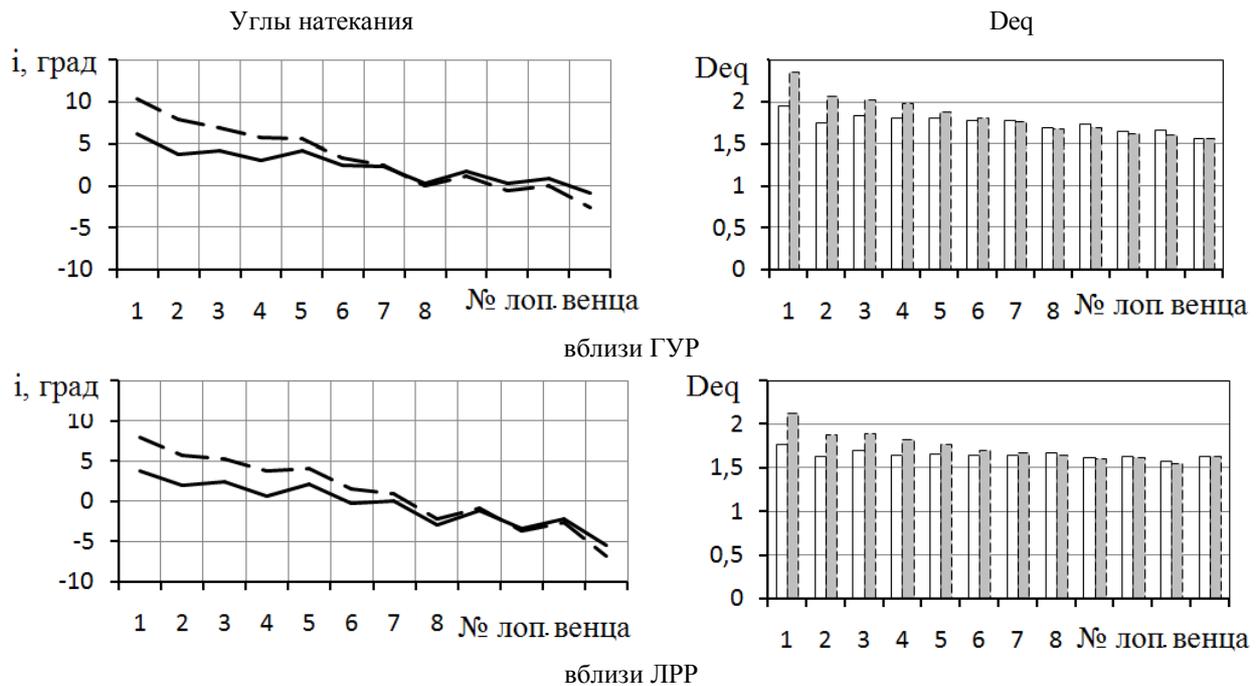


Рис. 6. Изменение углов натекания и параметра диффузорности течения вдоль проточной части на среднем радиусе:

---  $\bar{n} = 0,9$ , —  $\bar{n} = 1,0$

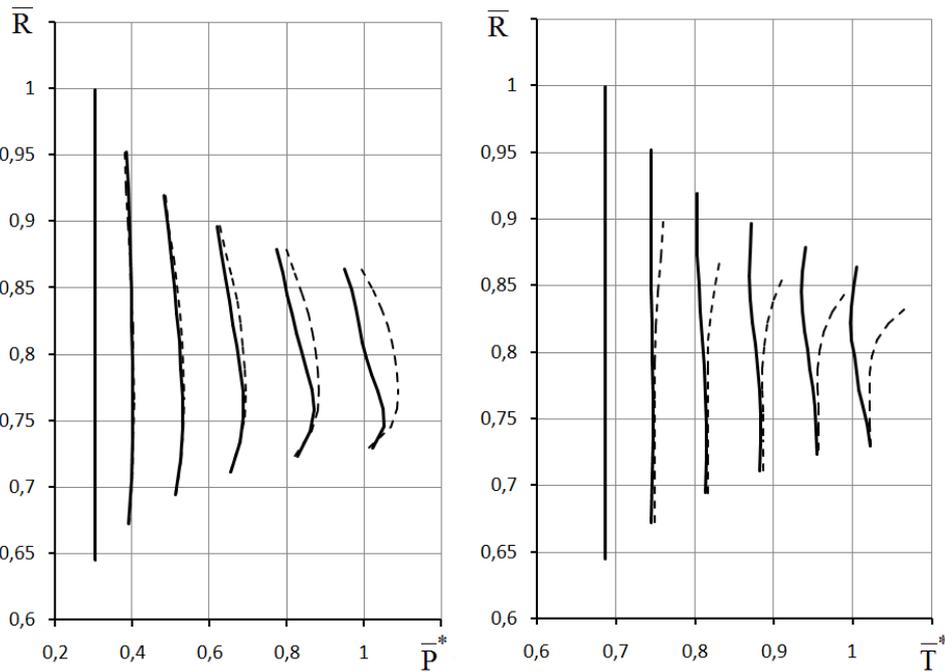


Рис. 7. Распределение параметров потока по радиусу:

— параметры в т. 1, --- параметры в т. 2

Из рисунка видно, что для режимов по частоте вращения ниже  $\bar{n} < 0,9$  возможно уменьшение величин запасов ГДУ ниже заданного уровня, что в свою очередь требует регулирования компрессора. Устойчивую работу компрессора в рассмотренном диапазоне режимов определяет РК первой ступени,

имеющее наибольший уровень параметра диффузорности. В качестве иллюстрации на рис. 9 показано изменение параметра диффузорности для лопаточных венцов от приведенной частоты вращения, полученное в результате расчета, на границе области устойчивой работы, определенной экспериментально.

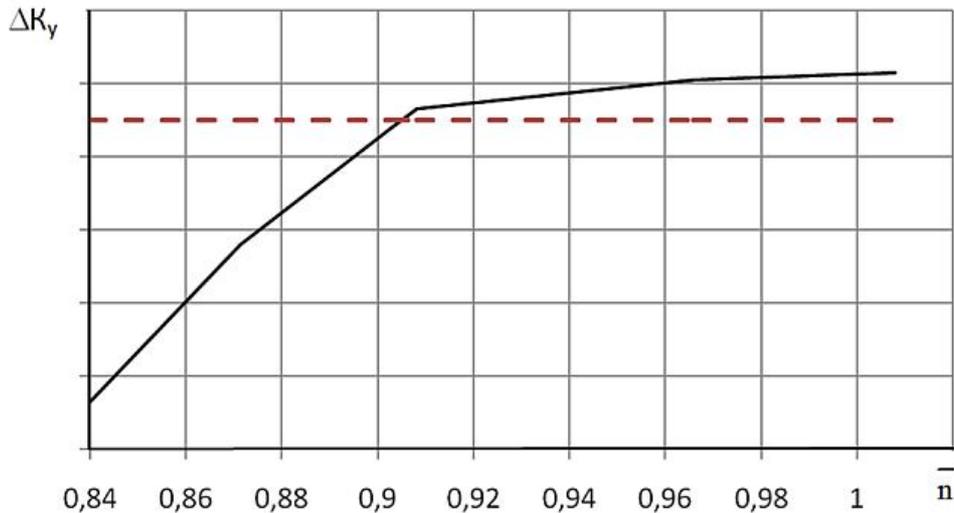


Рис. 8. Изменение запаса устойчивости многоступенчатого компрессора в зависимости от частоты вращения при закрытых клапанах перепуска

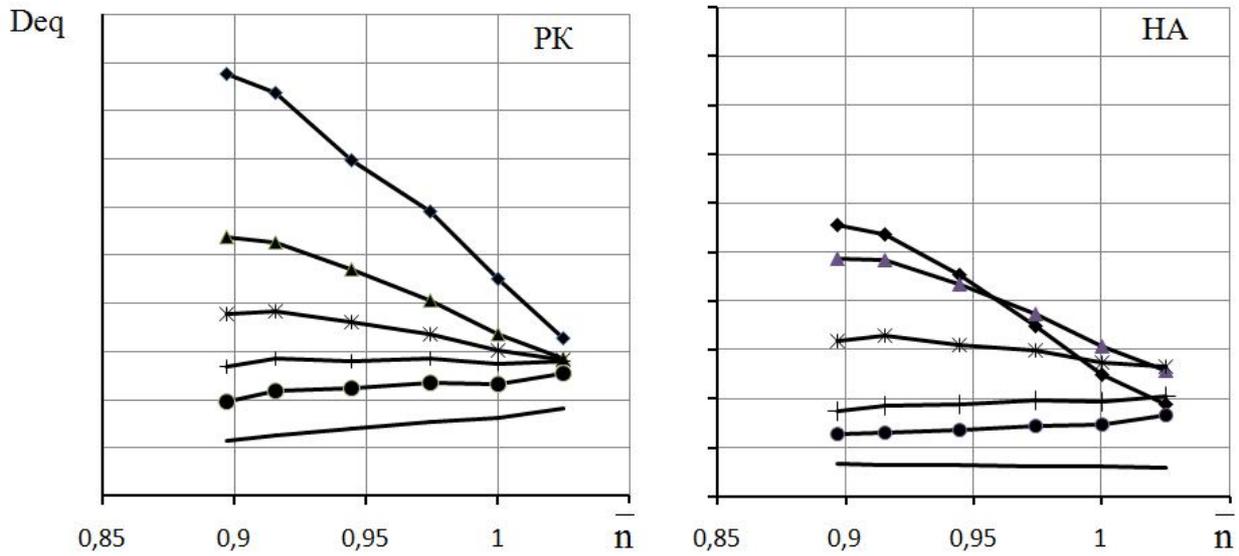


Рис. 9. Изменения параметра диффузности по лопаточным венцам:

- ◆ — 1-я ступень,      × — 4-я ступень,
- ▲ — 2-я ступень,      ● — 5-я ступень,
- \* — 3-я ступень,      — — 6-я ступень

Так как в конструкции компрессора, см. рис. 1, не предусмотрен поворот направляющих аппаратов, то необходимый уровень запаса ГДУ на этих режимах достигается путем перепуска воздуха из проточной части компрессора.

### Выводы

Проведено исследование суммарных характеристик МОК и параметров потока в его проточной части.

Показано удовлетворительное согласование результатов расчёта с опытными данными в исследованном диапазоне частот вращения  $\bar{n} = 0,897...1,025$ .

Анализ уровней изолиний чисел Маха позво-

лил получить представление о структуре течения в проточной части компрессора на "расчётном" режиме по частоте вращения и расходу. На высоких частотах вращения ротора имеет место трансзвуковое обтекание рабочих колес первых трех ступеней.

Проведен анализ параметра диффузности течения на "расчётном" режиме вблизи и границы области устойчивой работы, который позволил определить ступени инициаторы появления срывных явлений.

Проведен расчётный анализ запасов устойчивости компрессора, опирающийся на полученные в процессе исследования результаты.

Анализ структуры течения вдоль напорных веток позволяет наблюдать начало процесса запыления.

## Литература

1. Вейо. Расчет квазитрехмерного течения в лопаточных венцах турбомашин [Текст] / Вейо // Энергетические машины и установки. – 1973. – № 3. – С. 61-72.
2. Wang, Q. Quasi-three-dimensional and full three dimensional rotation flow calculations in turbomachines [Text] / Q. Wang, G. Zhu, C. H. Wu // J. Eng. Gas Turbines and Power. – 1985. – № 2. – P. 277-285.
3. Юсер. Квазитрехмерное решение методом конечных элементов задачи об установившемся течении сжимаемой жидкости в турбомашинных [Текст] / Юсер, Йеген, Дурмаз // Энергетические машины и установки. – 1983. – Т. 105. – № 3. – С. 79-86.
4. Хириш, К. Комбинированная программа расчета квазитрехмерного потока в турбомашинных методом конечных элементов [Текст] / К. Хириш, Г. Варзе // Энергетические машины и установки. – 1979. – № 1. – С. 151-159.
5. Янсен. Расчет характеристик осевых компрессоров [Текст] / Янсен, Моффат // Энергетические машины и установки. – 1967. – № 4. – С. 1-13.
6. Dring, R. P. Throughflow modeling of axial turbomachinery [Text] / R. P. Dring, H. D. Joslyn // J. Eng. Gas Turbines Power. – 1986. – Vol. 108, № 4. – P. 246-253.
7. Новак. Метод кривизны линий тока в вычислительных задачах для потока жидкости [Текст] / Новак // Энергетические машины и установки. – 1967. – № 4. – С. 30-41.
8. Сальников, В. С. К расчету осесимметричного потока в турбомашинных [Текст] / В. С. Сальников // Лопаточные машины и струйные аппараты. – 1972. – № 6. – С. 25-48.
9. Егоров, И. Н. Комплекс программ по расчету характеристик, оптимальному проектированию и управлению многоступенчатых осевых компрессоров [Текст] / И. Н. Егоров, В. С. Талызина, В. Н. Фомин // Научно-метод. матер. по процессам

и характеристик авиац. двигат. – М. : ВВИА им. Н. Е. Жуковского. – 1989. – С. 231-238.

10. Гроссман, Ф. Е. Разработка пакета прикладных программ по расчету проточной части стационарного осевого компрессора [Текст] / Ф. Е. Гроссман, А. П. Тарабрин // Повыш. эффективн., надежн. долговечн. компрес. и компрес. установок : Матер. 7-ой научн. конф. – Казань, 1987. – С. 3-10.
11. Бойко, Л. Г. Расчет течения в многоступенчатом осевом компрессоре [Текст] / Л. Г. Бойко, В. Н. Еришов // Газовая динамика двигателей и их элементов. – 1983. – № 2. – С. 19-25.
12. Косолапов, Ю. С. Решение задачи об осесимметричном течении газа в венце турбомашинной [Текст] / Ю. С. Косолапов, Е. Ю. Проценко // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1990. – № 4. – С. 105-113.
13. Бойко, Л. Г. Исследование структуры течения и суммарных характеристик многоступенчатых осевых компрессоров и их элементов с помощью комплекса методов поверочного расчета [Текст] / Л. Г. Бойко, А. Е. Демин // Компрессорная техника и пневматика в XXI веке : Тр. XIII международной научно-технической конференции по компрессоростроению. – Сумы : СумГУ. – 2004. – С. 218-230.
14. Комплекс методов поверочного расчета осевых и центробежных компрессоров [Текст] / Л. Г. Бойко, А. Е. Демин, Е. С. Барышева, Ю. П. Максимов, К. В. Фесенко // Труды XV Международной научно - технической конференции по компрессорной технике. – 19 - 20 июля 2011 г. – Казань, 2011. – Том 1. – С. 250-259.
15. Бойко, Л. Г. Метод расчёта до- и транзвукового течения в осевых компрессорах и результаты его апробации [Текст] / Л. Г. Бойко, М. А. Ковалёв // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического эксперимента : Тр. между. науч. техн. конф., Харьков, 29 сентября - 2 октября 1997 г. – Харьков : ИПМаш НАНУ. – 1997. – С. 260-263.

Поступила в редакцию 10.09.2014, рассмотрена на редколлегии 17.09.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор, зав. каф. технологии производства авиационных двигателей и энергетических установок А. И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

#### АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕЧІЇ ТА СУМАРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАГАТОСТУПЕНЕВОГО ВІСЬОВОГО КОМПРЕСОРА ГТД

Л. Г. Бойко, О. Є. Дьомін, Ю. П. Максимов, Ю. Ф. Ахтеменко, В. О. Калюжна

Приведено результати чисельного дослідження вісьосиметричної дозвукової течії у багатоступеневому вісьовому компресорі газотурбінного двигуна в широкому діапазоні робочих режимів без перепуску повітря з проточної частини. Представлено сумарні характеристики компресора на різних частотах обертання у зіставленні з експериментальними даними. Розглянуто структуру течії на трьох режимах по витраті при заданій частоті обертання. Показано зміну кутів натікання і параметра дифузорності по ступеням компресора в розглянутому діапазоні частот обертання.

**Ключові слова:** вісьовий багатоступеневий компресор, розрахункові режими роботи, структура течії, сумарні характеристики.

**GTE MULTISTAGE AXIAL COMPRESSOR SUMMARY PERFORMANCES  
AND FLOW FEATURES ANALYSIS**

*L. G. Boyko, A. E. Dyomin, U. P. Macsimov, U. F. Ahtemenko, V. A. Kaliuzhnaia*

Results of numeral research of gas turbine engine multistage axial compressor axisymmetric subsonic flow in the wide range of operating regimes without air bypass from air-gas channel are shown. Compressor summary performances with different frequencies of rotation in comparison with experimental data are presented. Flow structure for the three modes with different flow rate and rotation frequency constant is considered. The change of incidence angles and diffuser parameter by the compressor stages in the considered range of rotation frequencies is shown.

**Key words:** multistage axial compressor, design operation condition, flow structure, summary performances.

**Бойко Людмила Георгиевна** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой теории авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: boyko@d2.khai.edu.

**Дёмин Александр Евгеньевич** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник проблемной лаборатории газотурбинных двигателей и установок, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: boyko@d2.khai.edu.

**Максимов Юрий Петрович** – научный сотрудник проблемной лаборатории газотурбинных двигателей и установок, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: boyko@d2.khai.edu.

**Ахтеменко Юрий Фёдорович** – вед. конструктор ГП "Ивченко Прогресс", Запорожье, Украина.

**Калюжная Вера Алексеевна** – вед. конструктор ГП "Ивченко Прогресс", Запорожье, Украина.