

УДК 632.680

Л.Г. БОЙКО<sup>1</sup>, А.Е. ДЕМИН<sup>1</sup>, Ю.П. МАКСИМОВ<sup>1</sup>, В.С. БОРИСОВ<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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА С УЧЕТОМ ОТБОРА ВОЗДУХА

С помощью разработанного в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт" метода поверочного расчета осесимметричного течения в многоступенчатых осевых компрессорах проведено численное моделирование течения в компрессоре современного винтовентиляторного двигателя на режимах с перепуском воздуха из проточной части компрессора. Представлены суммарные характеристики компрессора в широком диапазоне режимов работы и радиальные эпюры параметров потока. Получена граница области устойчивой работы. Проведена оценка запасов газодинамической устойчивости (ГДУ).

**моделирование течения в многоступенчатых осевых компрессорах, перепуск воздуха, граница области устойчивой работы, запасы ГДУ**

### Введение

Отбор воздуха из проточной части компрессора газотурбинного двигателя, осуществляемый практически на всех режимах для охлаждения горячих элементов проточной части, наддува полостей, кондиционирования салона и др. оказывает влияние на работу его ступеней. На пониженных частотах вращения в целях обеспечения запасов устойчивости, включают перепуск воздуха через соответствующие клапаны (КПВ), что также приводит к изменению газодинамических параметров течения в компрессоре, особенно вблизи клапанов.

Режимы работы компрессоров с перепуском или отборами воздуха являются на сегодняшний день малоизученными. Как правило, изменение расхода воздуха в проточной части не принимается во внимание при проектировании лопаточных венцов и проведении поверочных расчетов. Количество отбираемого воздуха часто также не является строго регламентированным. В то же время отбор (перепуск) воздуха из проточной части приводит к изменению структуры течения в компрессоре, перераспределению нагрузок между ступенями, изменению их КПД и запасов газодинамической устойчивости. Поэтому

исследование таких режимов как экспериментальными, так и расчетными методами представляет интерес.

В национальном аэрокосмическом университете «ХАИ» в лаборатории аэродинамики компрессоров кафедры теории авиационных двигателей разработан метод поверочного аэродинамического расчета, реализованный в соответствующем комплексе программ ПК AxSum, который позволяет исследовать до-, транс- и сверхзвуковое течение в многоступенчатых осевых компрессорах в предположении осевой симметрии [1]. Естественным развитием этих работ является усовершенствование метода расчета, расширяющее область его возможного применения на случай течения с отбором (перепуском) рабочего тела из проточной части [2]. В настоящее время комплекс программ дополнен блоком, позволяющим определить положение границы области устойчивой работы расчетным путем

### Результаты исследований

В основе метода лежит описание течения в меридиональной плоскости в осесимметричной постановке с использованием уравнений Эйлера, запи-

санных в стационарной форме во вращающейся равномерно системе координат. Использование обобщенных координат  $(\xi, \eta, \varphi)$  (рис. 1), позволяет упростить постановку граничных условий и решение задачи. Ось  $\varphi$  этой системы совпадает с окружным направлением, а оси  $\xi$  и  $\eta$  в меридиональной плоскости — с границами области интегрирования.

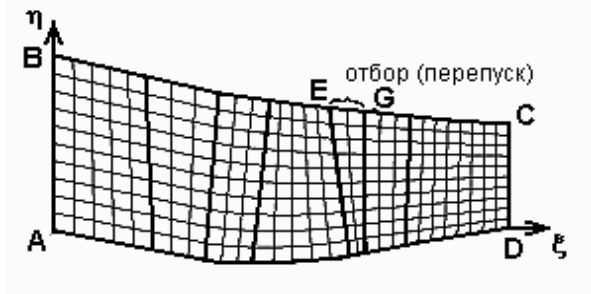


Рис. 1. Расчетная область

Использование функции тока  $\psi$  дает возможность свести систему уравнений к дифференциальному уравнению второго порядка в частных производных.

В уравнение движения, записанное в энергетической форме, введен косвенный учет проявления вязких эффектов

$$\vec{w} \times (\vec{\nabla} \times \vec{v}) = \vec{\nabla} H - T \cdot \vec{\nabla} S - \vec{D},$$

где  $v, w$  – векторы скорости в абсолютном и относительном движении;  $H$  и  $S$  – ротальпия и энтропия потока соответственно.

Вектор  $\vec{D}$ , являясь аналогом сил трения, направлен в сторону, противоположную вектору относительной скорости  $\vec{w}$ . Его величина определяется из условия полного преобразования механической энергии, затраченной на преодоление сил трения, в тепловую энергию:

$$\vec{D} = -\vec{w} \cdot D / w; \quad \vec{D} \cdot \vec{w} = T \cdot \vec{w} \cdot \vec{\nabla} S.$$

Осредненное в окружном направлении уравнение энергии представляет собой условие сохранения ротальпии

$$H = c_p \cdot T + (w^2 - u^2) / 2$$

вдоль поверхности тока  $\psi = \text{const}$ .

Для замыкания системы использовано уравнение состояния совершенного газа  $p = \rho R T$ . Задача ставится в физической области ABCD (рис. 1). На границах AB и CD задается либо распределение расхода (функции тока), либо угла наклона линий тока к оси турбомшины по радиусу. На втулочной поверхности AD задается условие непротекания, функция тока  $\psi = 0$ . На периферийной поверхности, на участках BE и GC, также задаются условия непротекания, однако функция тока имеет на этих участках разные значения. На участке BE  $\psi = 1$ ; на участке GC  $\psi = 1 - \Delta \bar{G}$ , где  $\Delta \bar{G} = G / G_g$  – количество отбираемого воздуха, отнесенное к величине расхода на входе. На участке отбора EG функция тока задается полиномиальной зависимостью  $\psi = f(\xi)$ , при определении коэффициентов которой в точках E и G ставятся условия непрерывности функции  $\psi$ .

Для выполнения поверочного расчета компрессора необходимо задать геометрические параметры проточной части и лопаточных венцов, режим работы по расходу и частоте вращения, расположение КПВ, расход перепускаемого воздуха, а также распределения по радиусу полной температуры, давления и величины закрутки или угла потока  $\alpha(r)$  во входном сечении.

Численная реализация решения системы уравнений и особенности расчета трансзвуковых режимов представлены в работе [2]. Учет проявления вязких свойств течения осуществлен с использованием обобщенных результатов экспериментальных исследований.

Расчетное исследование структуры течения в многоступенчатом осевом компрессоре современного авиационного двигателя, результаты которого представлены ниже, проведено в два этапа. В начале выполнен расчет течения при закрытых клапанах перепуска, который сопровождался детальным сопоставлением полученных результатов с опытными

данными (рис. 2). Это позволило создать двумерную модель исследуемого компрессора, на базе которой на следующем этапе осуществлено исследование течения на пониженных частотах вращения при открытых клапанах перепуска, расположенных за НА четвертой ступени.

При моделировании течения поле полных температур и давлений на входе в компрессор принято равномерным и соответствующим стандартным атмосферным условиям ( $T^* = 288 \text{ К}$ ,  $P^* = 101325 \text{ Па}$ ).

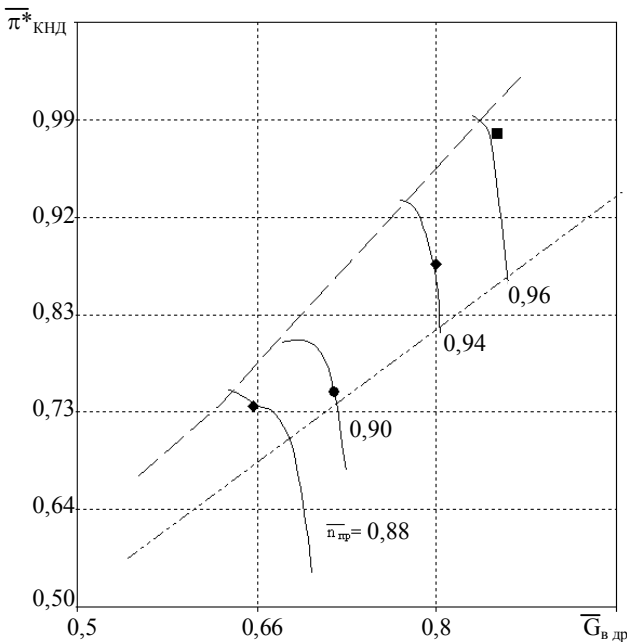


Рис. 2. Характеристика компрессора в безразмерных координатах  
 ■ ● ◆ — экспериментальные данные;  
 - - - - граница устойчивой работы;  
 - · - · - линия рабочих режимов;  
 ————— расчет

На рис. 3 показаны суммарные характеристики компрессора, полученные расчетным путем, в зависимости от приведенного расхода воздуха на входе, представленные в безразмерном виде:

$$\bar{G}_{в,др} = G_{в,др} / G_{в,др,р}; \quad \bar{\pi}^*_{кнд} = \pi^*_{кнд} / \pi^*_{кнд,р},$$

где  $p$  — расчетный режим. Там же приведена полученная расчетным путем граница области устойчивых режимов работы компрессора. Как показано на рис. 3, наличие перепуска незначительно сдвигает ветви характеристики в сторону увеличения расхода воздуха через компрессор. В связи с изменением

положения линии рабочих режимов (ЛРР) запасы устойчивости компрессора возрастают (рис. 4)

Более существенно характеристики компрессора "расслаиваются", если их представить в виде зависимости от расхода воздуха на выходе (рис. 5):

$$\bar{G}_{к,пр} = G_k / G_{в,др}.$$

При этом открытие клапанов сдвигает характеристику компрессора влево, в сторону меньших расходов.

Отбор воздуха из проточной части приводит к снижению КПД компрессора, так как часть энергии, переданной потоку, уходит с рабочим телом через клапаны перепуска. В частности, проведенные расчеты показали, что на режиме  $\bar{n}_{пр} = 0,88$  при  $\Delta \bar{G} = 10\%$  максимальное значение изэнтропического КПД компрессора падает на 10%.

Далее представлены результаты исследования влияния отбора воздуха за НА 4 ступени на течение в компрессоре при  $\bar{n}_{пр} = 0,88$  в точках 1 и 2 характеристики (рис. 3), соответствующих линии рабочих режимов. Количество перепускаемого воздуха составляло 10 % от  $G_{в}$ .

Открытие клапанов приводит к перестроению течения в проточной части.

На рис. 6 показаны линии тока на режиме  $\bar{n}_{пр} = 0,88$  об/мин в исследуемом компрессоре при наличии перепуска воздуха. Вблизи клапанов перепуска воздуха, расположенных между направляющим аппаратом четвертой ступени и рабочим колесом пятой ступени, линии тока искривляются и устремляются к периферии, где часть расхода рабочего тела уходит из проточной части компрессора.

Деформация линий тока отражает сильное влияние перепуска на структуру течения в межлопаточных каналах венцов.

На рис. 7 приведены радиальные эпюры полных температур и давлений за направляющими аппаратами компрессора, полученные с учетом и без учета перепуска в точках 1 и 2 характеристики.

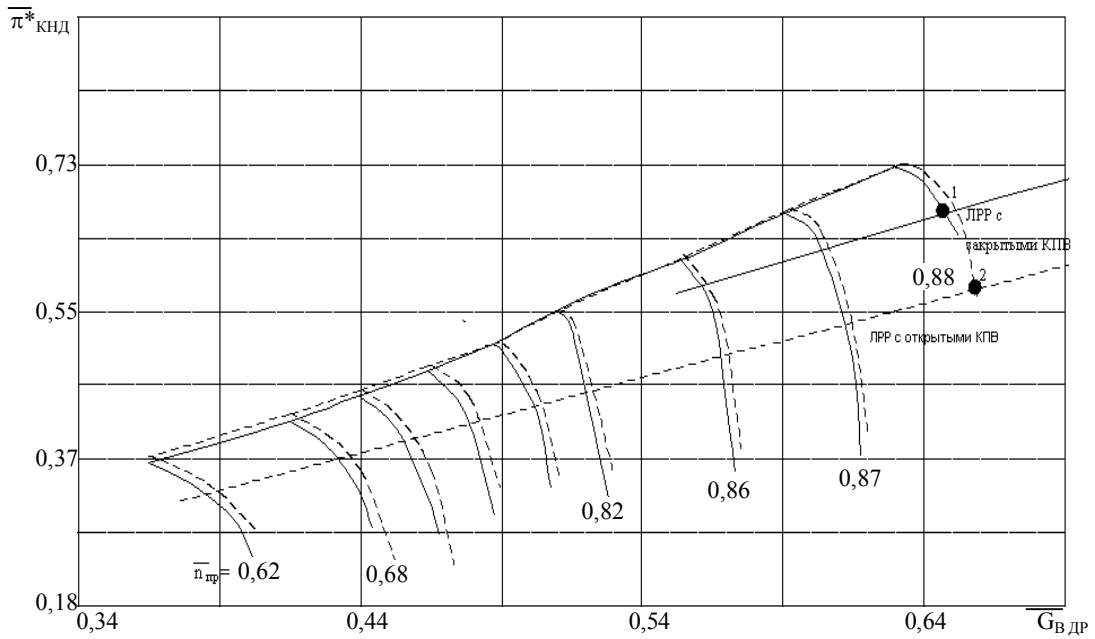


Рис. 3. Характеристика компрессора в безразмерных координатах: непрерывная линия – без учета перепуска; пунктирная – с учетом перепуска,  $\Delta \bar{G} = 10\%$

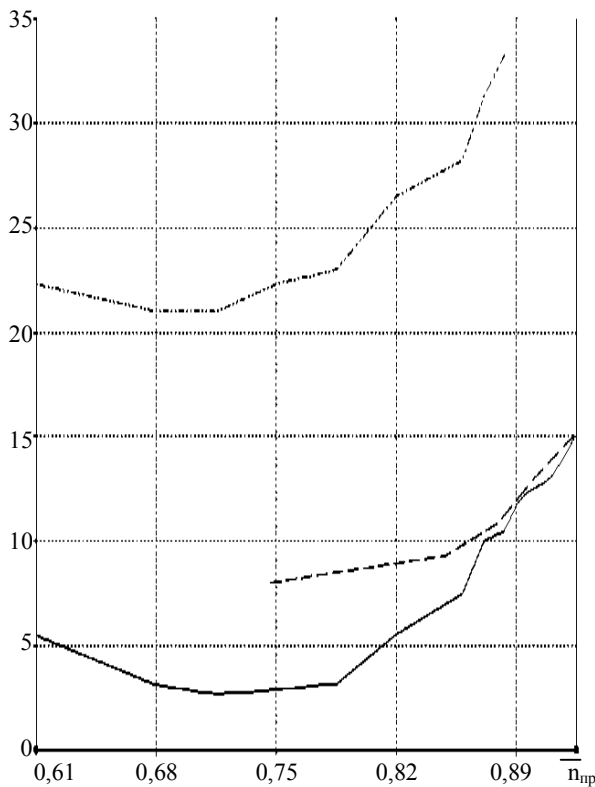


Рис. 4. Запасы устойчивости компрессора: непрерывная линия – без учета перепуска; пунктирная – без учета перепуска (эксперимент); пунктирная с точками – с учетом перепуска,  $\Delta \bar{G} = 10\%$

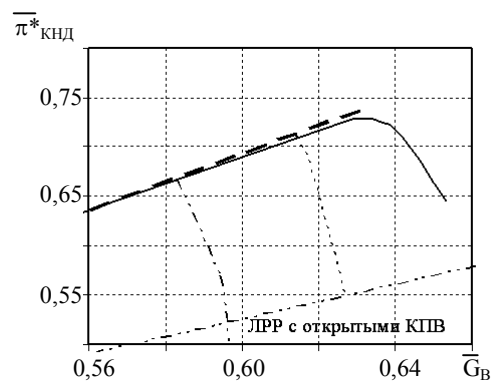


Рис. 5. Характеристика компрессора в зависимости от безразмерного расхода воздуха по выходу,  $\bar{n}_{пр} = 0,88$ :

- — без учета перепуска;
- - - с учетом перепуска  $\Delta \bar{G} = 5\%$ ;
- · - с учетом перепуска  $\Delta \bar{G} = 10\%$

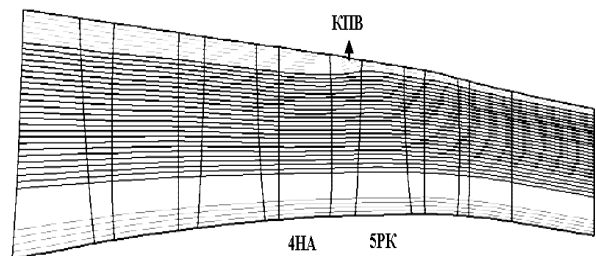


Рис. 6. Линии тока в компрессоре при открытых клапанах перепуска

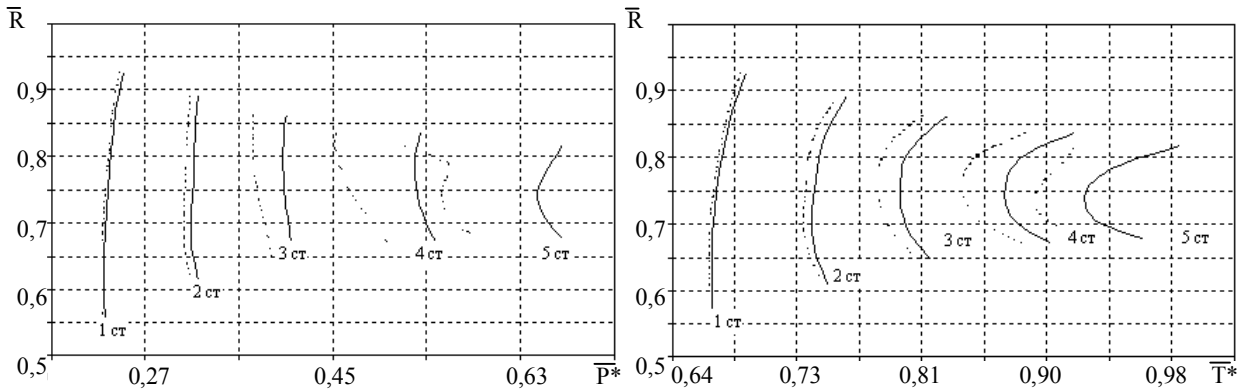


Рис. 7. Распределение полных давлений и температур за направляющими аппаратами по высоте лопатки на линии рабочих режимов,  $\bar{n}_{np} = 0,88$  об/мин в точках 1 и 2: непрерывная линия – без учета перепуска; пунктирная – с учетом перепуска

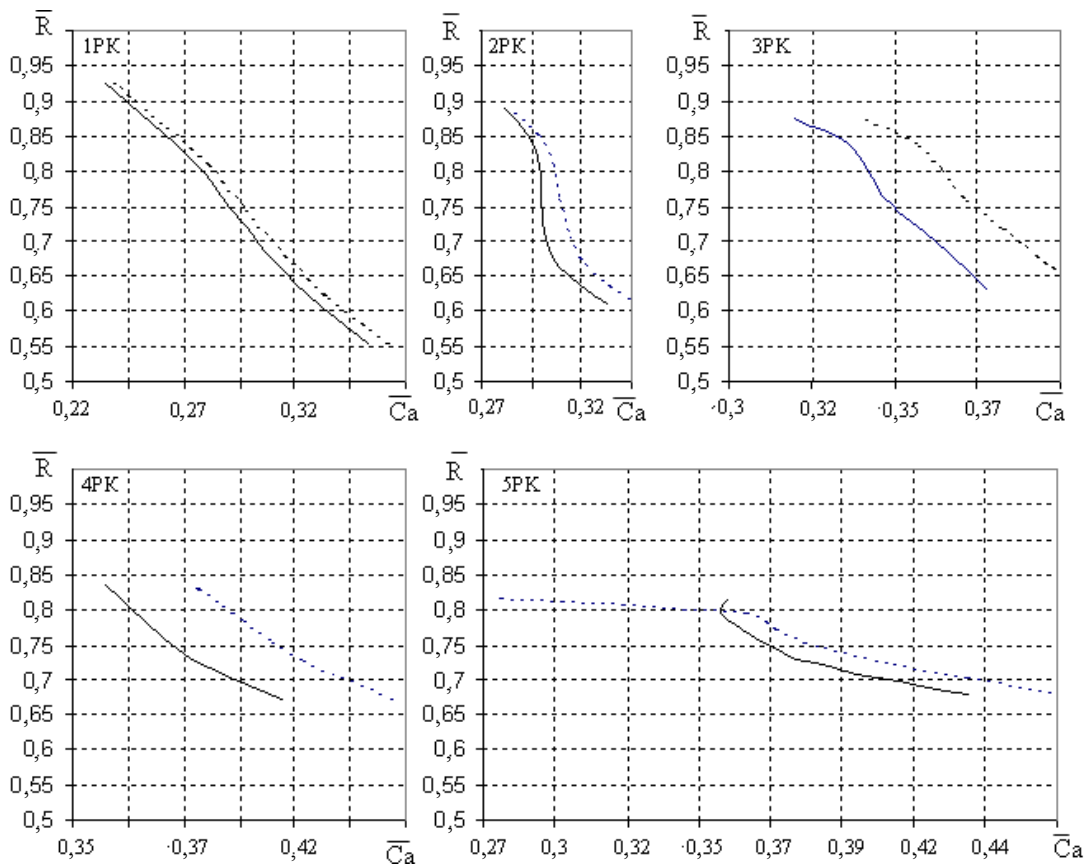


Рис. 8. Распределение осевых скоростей за рабочими колесами по высоте лопатки на линиях рабочих режимов (точки 1, 2),  $\bar{n}_{np} = 0,88$  в точках 1 и 2: непрерывная линия – без учета перепуска; пунктирная – с учетом перепуска

Изменение формы распределения параметров по высоте лопатки связано с отбором массы рабочего тела и изменением скорости потока на периферии проточной части до и после клапанов перепуска воздуха, (рис. 8). Скорость потока растет по мере приближения к клапану. После отбора рабочего тела скорость течения в проточной части резко падает,

что в свою очередь приводит к изменению углов натекания.

Рис. 9 иллюстрирует снижение углов натекания на рабочие колеса перед клапанами перепуска и интенсивный их рост в периферийной области после КПВ. В соответствии с полученными результатами, углы натекания на лопатки пятого рабочего колеса

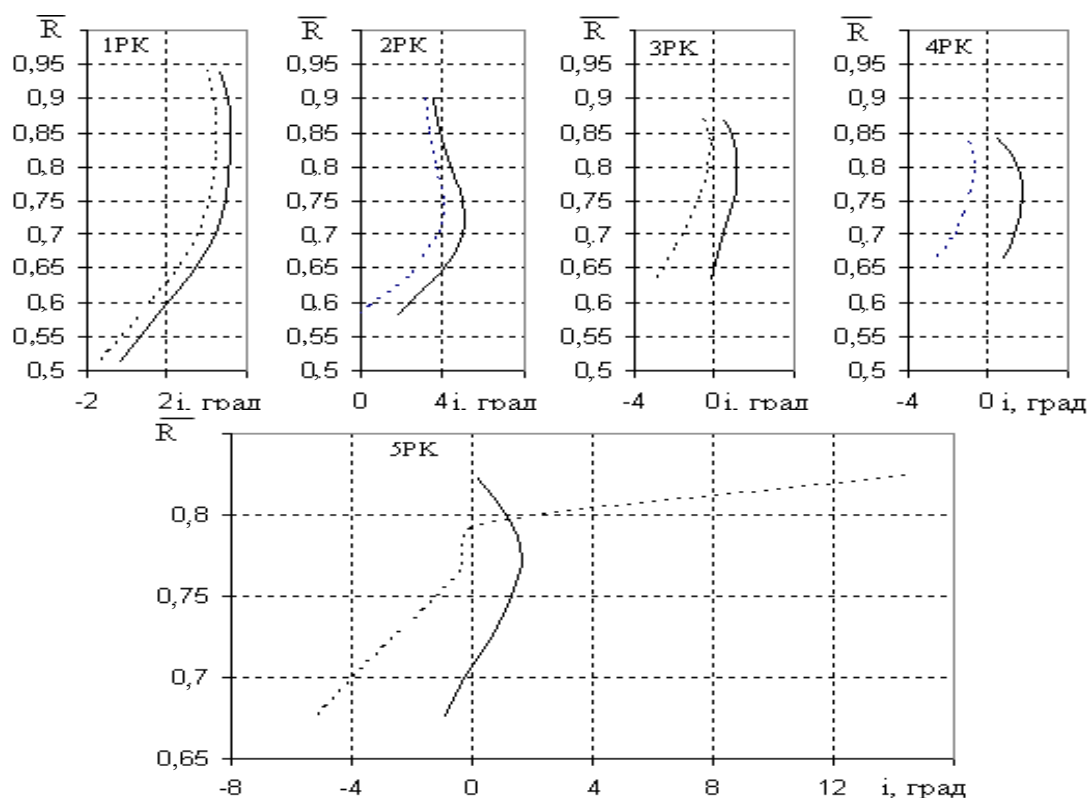


Рис. 9. Распределение углов натекания на рабочие колеса по высоте лопатки на линиях рабочих режимов (точки 1, 2),  $\bar{n}_{пр} = 0,88$  в точках 1 и 2: непрерывная линия – без учета перепуска; пунктирная – с учетом перепуска

при работе с открытыми клапанами возрастают до + 15° в периферийной области, что естественно, приводит к росту нагрузки на лопатки, которая является нестационарной.

Возможен также отрыв потока в этой области, что в свою очередь может инициировать нарушение устойчивости течения.

### Заключение

Приведенные выше результаты численного моделирования течения в многоступенчатом осевом компрессоре на режимах с перепуском воздуха позволяют сделать следующие выводы.

Наличие перепуска (отбора) меняет условия обтекания лопаточных венцов, особенно вблизи места отбора. Возможно появление больших положительных углов натекания на лопаточные венцы, расположенные ниже по потоку от места отбора. Поэтому при проектировании многоступенчатых машин следует обращать особое внимание на обтекание таких

ступеней и учитывать наличие отбора путем специального профилирования периферийных областей

### Литература

1. Бойко Л.Г., Ковалев М.А. Метод расчета до- и трансзвуковых течений в осевых компрессорах и результаты его апробации // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: – Х.: ИПМаш. – 1997. – С. 231 – 234.
2. Бойко Л.Г., Ковалёв М.А., Муравченко О.Ф. Двумерная математическая модель течения в осевом компрессоре с учётом отбора (перепуска) воздуха // Авиационно-космическая техника и технология: – Х.: Гос. аэрокосм ун-т «ХАИ». – 2000. – Вып. 19. Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 83 – 87.

Поступила в редакцию 31.05.2005

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