

УДК 621.45.037

Л. Г. БОЙКО¹, А. Е. ДЁМИН¹, О. Д. ДЕГТЯРЁВ¹, Ю. Ф. АХТЁМЕНКО²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *ГП "Ивченко-Прогресс", Украина*

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В МНОГОСТУПЕНЧАТОМ ОСЕВОМ КОМПРЕССОРЕ ПРИВОДНОГО ТУРБОВАЛЬНОГО ГТД НА ПОНИЖЕННЫХ РЕЖИМАХ

Приведены результаты численного исследования осесимметричного течения в многоступенчатом осевом компрессоре газотурбинного двигателя с учетом перепуска воздуха из проточной части на пониженных режимах. Представлены суммарные характеристики компрессора на различных частотах вращения при открытых и закрытых клапанах перепуска в сопоставлении с экспериментальными данными. Предложена программа регулирования работы клапана перепуска компрессора, позволяющая при минимальных значениях расхода воздуха, проходящего через него, обеспечить необходимый запас газодинамической устойчивости.

Ключевые слова: *осевой многоступенчатый компрессор, нерасчетные режимы работы, численное исследование течения с перепуском воздуха из проточной части компрессора, регулирование работы клапана перепуска.*

Введение

При адаптации авиационного двигателя для эксплуатации в качестве наземного газотурбинного привода его термогазодинамические параметры претерпевают существенные изменения. В частности, снижение температуры газа перед турбиной и связанное с ним уменьшение степени повышения давления воздуха в компрессоре сопровождается снижением частоты вращения ротора.

Существуют и другие факторы, приводящие к необходимости изменения режима работы газотурбинного привода, связанные с особенностями конкретных условий эксплуатации. В частности, для газоперекачивающей отрасли это изменение условий добычи, определяемое изменением во времени давления газа в пластах, продуктивности скважин, глубины залегания и т.д. В силу этого изменяются параметры газа на входе в нагнетатель и потребляемая им мощность. При компримировании газа с изменяющимися в широких пределах молярными массами (17...27 кг/кмоль) возникает необходимость изменять соответственно режимы работы привода.

Таким образом, в наземных условиях существует необходимость эксплуатировать газотурбинные приводы в широком диапазоне режимов, в том числе и на пониженных частотах вращения (частичных режимах). При этом режимы работы всех узлов двигателя уходят из "расчетной" области, и обеспечение их эффективной работы в этих условиях является важной задачей.

Многоступенчатый осевой компрессор авиаци-

онного газотурбинного двигателя является одним из наиболее сложных его узлов. В этой связи исследование работы многоступенчатого осевого компрессора на пониженных частотах вращения представляется целесообразным. Частичные режимы достаточно сложны для эксплуатации. Для обеспечения устойчивой работы компрессора и двигателя в целом необходимо выполнять регулирование путем поворота направляющих аппаратов (НА) или перепуска воздуха из проточной части.

В проблемной научно-исследовательской лаборатории газотурбинных двигателей и установок Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ" разработан комплекс программ, позволяющий анализировать структуру течения и суммарные характеристики осевых и центробежных низко- и высоконапорных компрессорных ступеней, а также многоступенчатых осевых компрессоров с учетом отбора (перепуска) воздуха из проточной части [1, 2].

В статье представлены результаты численного исследования течения в многоступенчатом осевом компрессоре газотурбинного привода при открытых и закрытых клапанах перепуска на пониженных частотах вращения.

Объект исследования

На рис. 1 представлен объект исследования – многоступенчатый осевой компрессор низкого давления современного ГТД. Все направляющие аппараты – нерегулируемые, клапан перепуска воздуха

расположен за третьей ступенью (на расчётной схеме – участок АВ).

Для проведения расчетных исследований использован программный комплекс (ПК) AxSym, предназначенный для численного моделирования до- и транзвукового осесимметричного течения в многоступенчатых осевых компрессорах ГТД [1...3].

Исходными данными для расчета являются геометрические параметры проточной части и лопаточных венцов, режим работы по расходу и частоте вращения и радиальные эпюры параметров потока в сечении на входе. Программный комплекс AxSym позволяет учитывать влияние отбора (перепуска)

воздуха из проточной части компрессора на его суммарные характеристики и поля параметров потока[4].

На рисунке 2 показана суммарная характеристика исследуемого компрессора без перепуска воздуха, представленная в безразмерных параметрах $\pi_k^* = \pi_k^* / \pi_{кр}^*$, $\bar{G}_B = G_B^* / G_{Bр}^*$ и $\bar{n} = n / n_p$ в сопоставлении с экспериментальными данными. Там же приведены линия рабочих режимов (ЛРР) и граница области устойчивой работы (ГУР), соответствующие опытным данным.

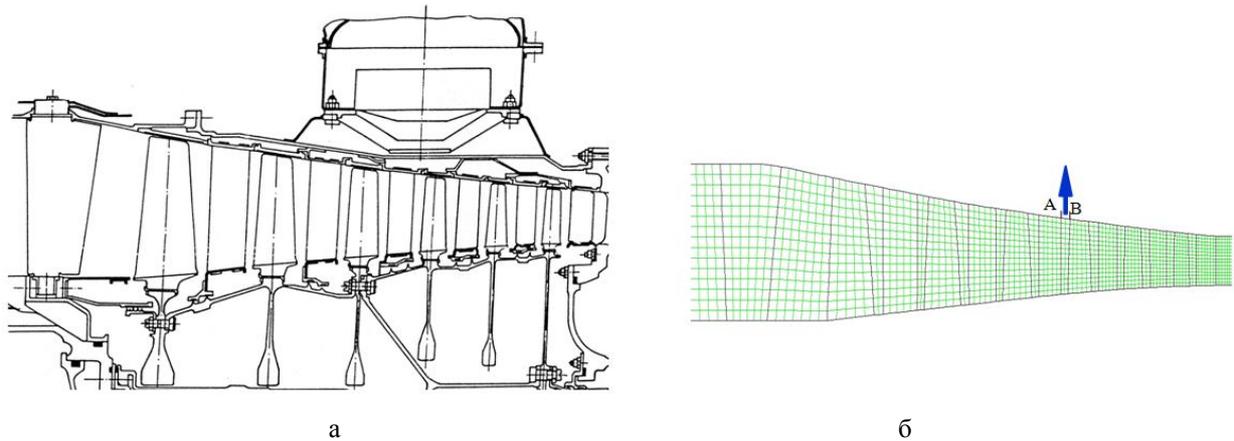


Рис. 1. Многоступенчатый осевой компрессор газотурбинного двигателя: а – проточная часть, б – расчётная схема

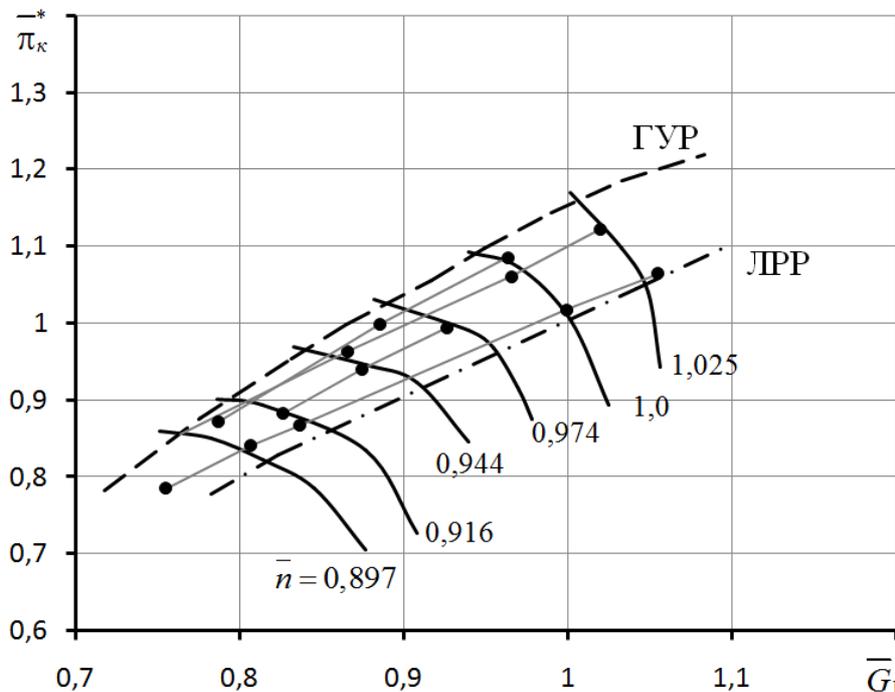


Рис. 2. Суммарная характеристика многоступенчатого осевого компрессора ГТД:
 —●— экспериментальные данные, - - - - - ЛРР,
 - · - · - - - - - ГУР, — расчет AxSym

На рисунке 3 представлены величины запасов устойчивости ΔK_u , полученные на основе результатов расчёта в диапазоне частот вращения $\bar{n} = 0,84 \dots 1,05$. Штриховой линией показан минимальный допустимый уровень запаса ГДУ, принятый для данного исследования.

Из рисунка следует, что при $\bar{n} < 0,9$ запасы устойчивости становятся недостаточными. Для обеспечения устойчивой работы на этих режимах необходимо открывать клапаны перепуска.

Режимы работы компрессора с перепуском воздуха из проточной части

С помощью ПК AxSum проведены расчеты течения в исследуемом компрессоре с относительной величиной расхода перепускаемого воздуха

$$\Delta \bar{G}_{\text{пер}} = \frac{G_{\text{пер}}}{G_{\text{Ввх}}} = 3\% \text{ и } 5\%, \text{ а также без перепуска.}$$

На рисунке 4 представлена суммарная характеристика компрессора на пониженных ($\bar{n} < 0,9$) частотах вращения при открытых и закрытых клапанах перепуска воздуха.

Рисунок 4 а иллюстрирует изменение КПД компрессора на соответствующих частотах без перепуска воздуха (сплошная линия), а также "кажущийся" КПД при открытых клапанах перепуска, определяемый с использованием классических зависимостей [5] по заторможенным параметрам потока перед и за компрессором без учета перепуска (штриховые линии с маркерами) и "реальный" КПД, определяемый с учетом работы, затраченной на сжатие перепускаемого воздуха (штриховые линии без маркеров).

Представленные на рис. 4 б линии, определяющие границу области устойчивой работы компрессора при открытых клапанах перепуска, получены по значениям параметра диффузорности на границе устойчивости, которые были получены на основании экспериментальных данных для данного компрессора без перепуска воздуха. Положение линии рабочих режимов (ЛРР) определяется из условия совместной работы узлов газогенератора. На данном этапе исследования использована опытная ЛРР двигателя при закрытых клапанах перепуска.

Рисунок 4 б отражает смещение границы области устойчивой работы в область меньших расходов при открытии клапана. Из приведенной на рисунке информации следует, что перепуск рабочего тела из проточной части компрессора ведет к расширению диапазона рабочих режимов по расходу и весьма существенному снижению КПД.

В свете этого, при необходимости обеспечения

работы компрессора с открытыми клапанами следует рассмотреть вопрос об определении минимально необходимого для исследуемой установки расхода перепускаемого воздуха, обеспечивающего достаточные запасы устойчивости, организации регулирования пропускной способности клапана в зависимости от режима работы двигателя.

Изменение структуры течения в компрессоре при открытии клапана перепуска на режиме $\bar{n} = 0,87$ показано на рис. 5, на котором представлены в сопоставлении изолинии чисел Маха в компрессоре на режиме вблизи ЛРР при различных расходах перепускаемого воздуха ($\Delta \bar{G}_{\text{пер}} = 0$ и 5 % от расхода воздуха на входе). Отдельно вынесен фрагмент проточной части компрессора вблизи места перепуска воздуха с изолиниями чисел Маха и линиями тока при открытом клапане перепуска (рис. 5 б). В рабочих колёсах числа Маха показаны в относительном движении, в направляющих аппаратах – в абсолютном. Наличие изолиний позволяет анализировать структуру течения во всех лопаточных венцах. Аналогично могут быть построены изолинии других параметров потока в проточной части и получены радиальные эпюры углов натекания, π^* , КПД и др. в осевых зазорах между лопатками.

Как видно из приведенных рисунков во входной части лопаток первых трёх ступеней скорости осредненного в окружном направлении потока вменяются незначительно. Имеющиеся в привтулочной области лопаточных венцов компрессора после РКЗ области низких скоростей с увеличением расхода перепускаемого воздуха уменьшаются, что может быть интерпретировано как уменьшение отрывных областей.

Как следует из рис. 4, положение границы области устойчивой работы зависит от количества перепускаемого воздуха. На рис. 6 показано изменение запасов газодинамической устойчивости в зависимости от количества перепускаемого воздуха для рассмотренных частот вращения.

Приведенные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности изменения расхода перепускаемого воздуха в зависимости от частоты вращения в целях повышения экономичности при обеспечении необходимого уровня ΔK_u . На рис. 7 предложена зависимость изменения расхода воздуха, перепускаемого из проточной части на различных режимах, использование которой позволяет обеспечить заданный запас устойчивости и снизить потери мощности в результате перепуска.

Приведенные результаты показывают, что с помощью расчетов аналогичных представленным выше, можно прогнозировать необходимый для обеспечения заданного запаса устойчивости расход

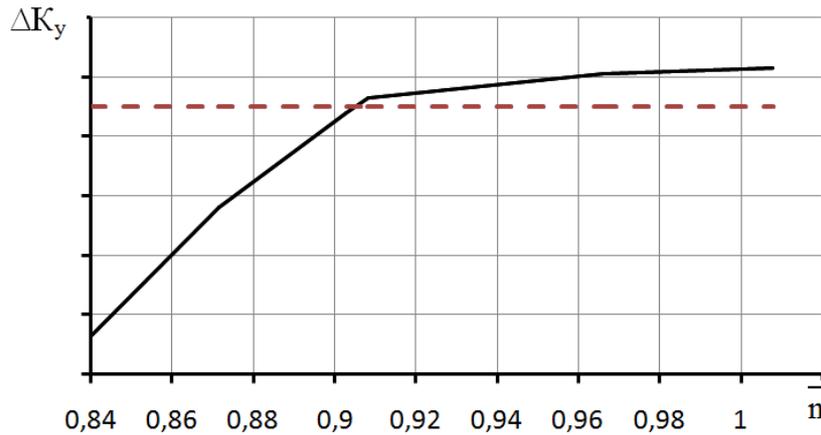


Рис. 3. Изменение запаса устойчивости многоступенчатого компрессора в зависимости от частоты вращения при закрытых клапанах перепуска

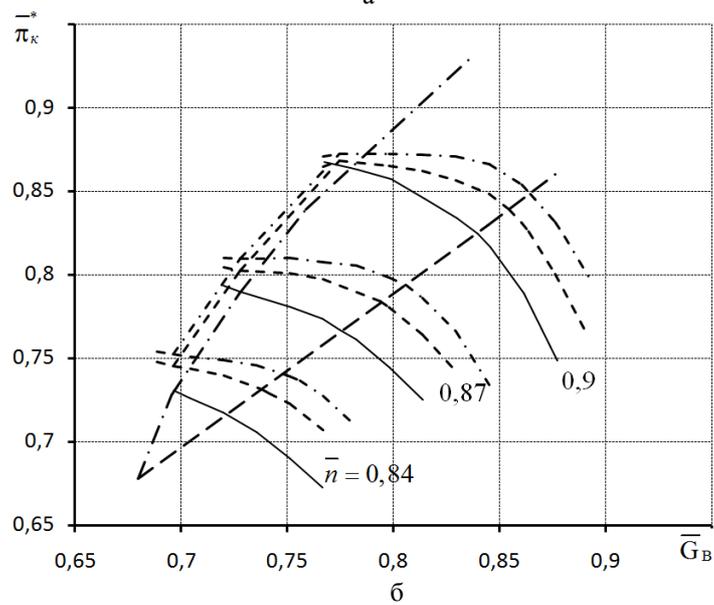
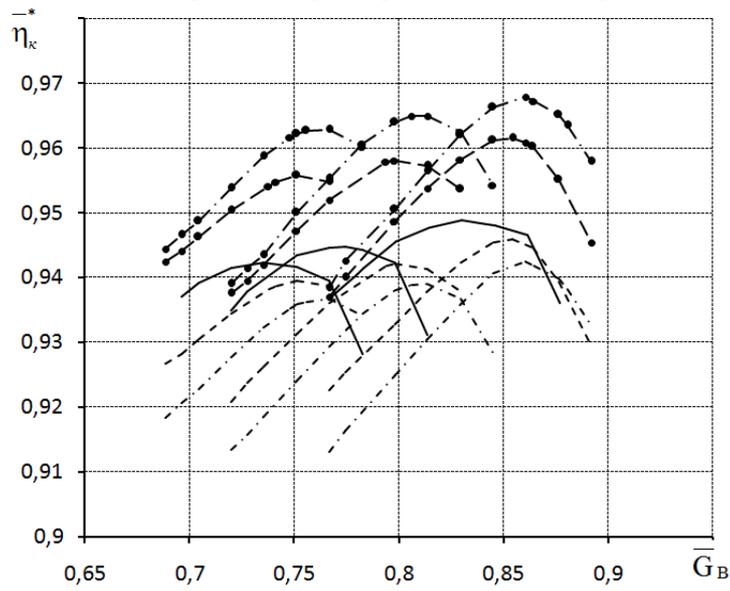


Рис. 4. Характеристика компрессора при открытых и закрытых клапанах перепуска:
 — без перепуска, — · — · — перепуск $\Delta \bar{G}_{пер} = 3\%$, — — — — перепуск $\Delta \bar{G}_{пер} = 5\%$

перепускаемого воздуха на низких частотах вращения ротора. Например, в соответствии с рис. 6 для частоты вращения $\bar{n} = 0,84$, потребуется перепуск $\Delta \bar{G}_{пер} \sim 11...12\%$ расхода на входе (пересечение пунктирной линии, с заданным уровнем ДКу).

Следует отметить, что для реализации данной программы изменения расхода перепускаемого воздуха требуется дополнительное устройство, обеспечивающее в автоматизированном режиме его регулирование.

На сегодняшний день в ГП "Ивченко Прогресс" (Украина) ведутся работы по созданию устройства подобного типа.

Выводы

Приведены результаты расчётного исследования в широком диапазоне частот вращения суммар-

ных характеристик многоступенчатого осевого компрессора. Особое внимание уделено исследованию особенностей течения в компрессоре на пониженных режимах.

Исследованы суммарные характеристики и структура течения при работе компрессора с открытыми и закрытыми клапанами перепуска, проведено их сопоставление.

Выполненные расчеты позволяют оценить возможности расширения диапазона устойчивой работы компрессора, а также снижение КПД при работе с открытыми клапанами. Рассмотрено влияние на эти параметры расхода перепускаемого воздуха. Предложена зависимость, позволяющая определить целесообразное значение расхода воздуха, перепускаемого из проточной части с целью снижения потерь мощности.

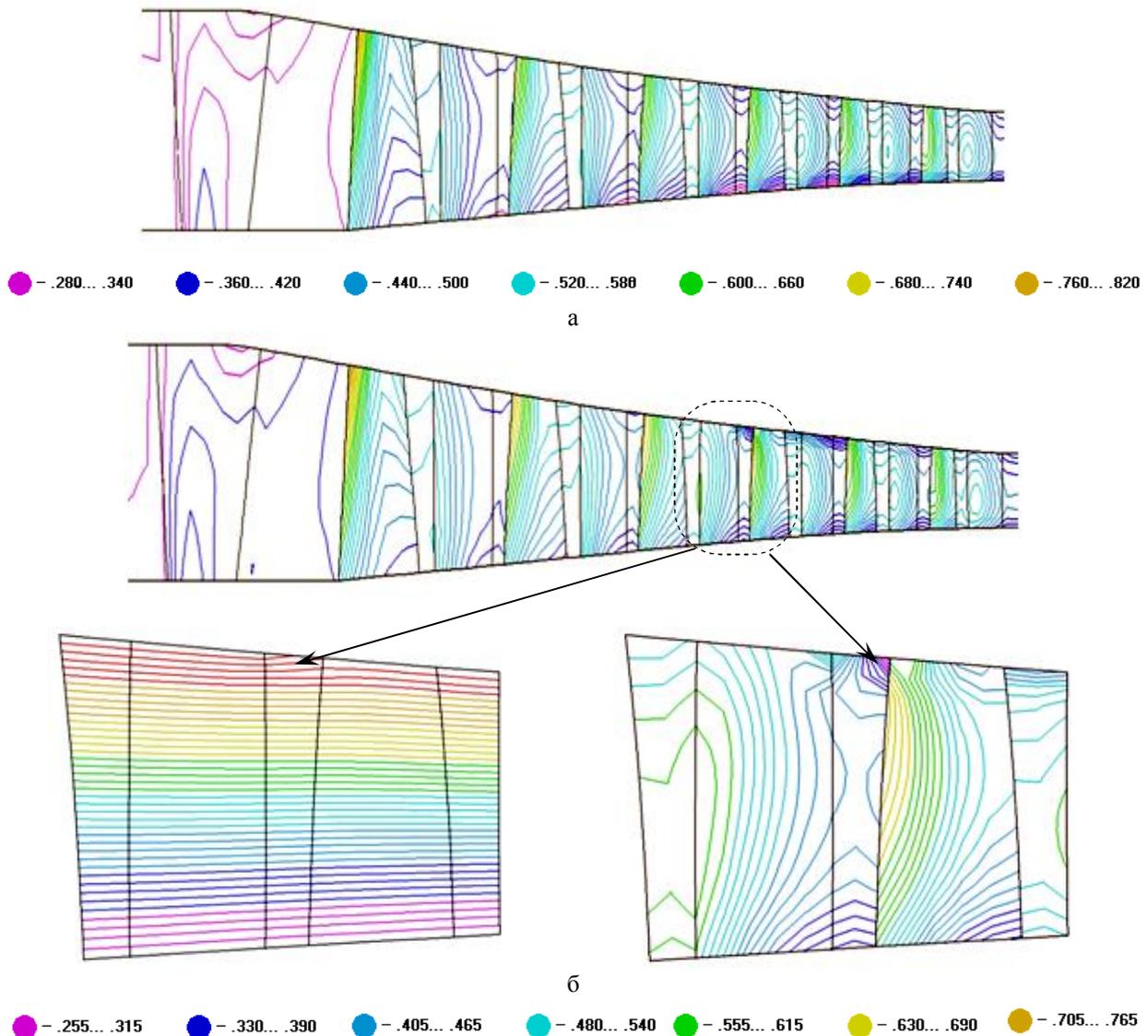


Рис. 5. Изолинии чисел Маха в проточной части компрессора при открытом клапане перепуска при различных $\Delta \bar{G}_{пер}$: а - $\Delta \bar{G}_{пер} = 0\%$, б - $\Delta \bar{G}_{пер} = 5\%$

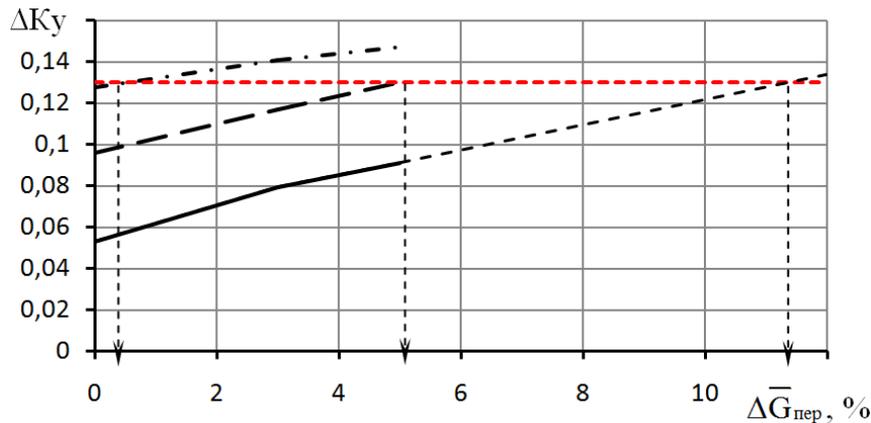


Рис. 6. Изменение запасов газодинамической устойчивости для различных частот вращения:

— $\bar{n} = 0,84$, — — — $\bar{n} = 0,87$, — · — · — $\bar{n} = 0,9$

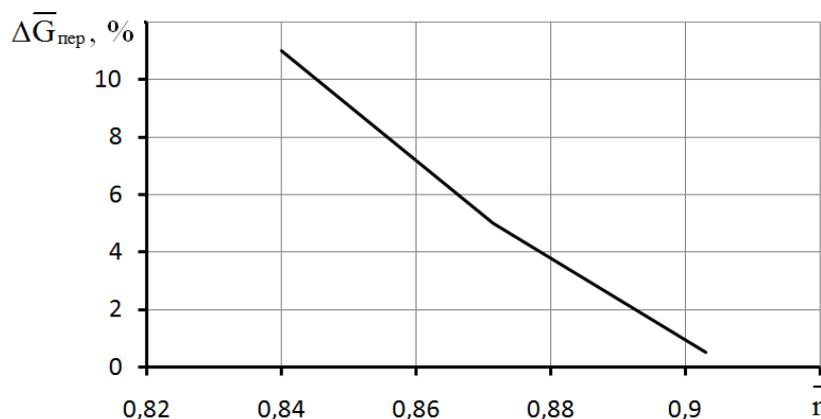


Рис. 7. Целесообразное изменение расхода перепускаемого воздуха на режимах $\bar{n} < 0,9$ для обеспечения заданного запаса устойчивости

Литература

1. 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, Казань, 19 - 20 июля, 2011 г. – Казань, 2011. – Том 1. – С. 250-259.

2. Методы расчетного исследования течений в осевых и центробежных компрессорах и результаты их практического использования [Текст] / Л. Г. Бойко, Е. С. Барышева, А. Е. Демин, Ю. П. Максимов, К. В. Фесенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 10(87). – С. 63-69.

3. Исследование влияния отбора воздуха на структуру течения и характеристики многоступенчатого осевого компрессора [Текст] / Л. Г. Бойко, А. Е. Демин, Ю. П. Максимов и др. // Компрессорная техника и пневматика. – 2004. – № 7 – С. 30-32.

4. Бойко, Л. Г. Апробация метода расчета осесимметричного течения в многоступенчатом компрессоре с учетом перепуска воздуха [Текст] / Л. Г. Бойко, М. А. Ковалёв, О. Ф. Муравченко // Авиационно-космічна техніка і технологія : Зб.наук.праць. Нац. аерокосм. ун-та "Харк. авіац. ін-т.". – Вип. 26. Двигуни та енергоустановки. – Харків, 2001. – С. 72-74.

5. Нечаев, Ю. Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 1 [Текст] / Ю. Н. Нечаев, Р. М. Федоров. – М.: Машиностроение, 1977. – 312 с.

Поступила в редакцию 10.09.2014, рассмотрена на редколлегии 19.11.2014

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.

**РОЗРАХУНКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕЧІЇ У БАГАТОСТУПЕНЕВОМУ
ВІСЬОВОМУ КОМПРЕСОРИ ПРИВІДНОГО ТУРБОВАЛЬНОГО ГТД
НА ЗНИЖЕНИХ РЕЖИМАХ**

Л. Г. Бойко, О. Є. Дьомін, О. Д. Дегтярьов, Ю. Ф. Ахтеменко

Приведено результати чисельного дослідження осьосиметричної течії у багатоступеневому осьовому компресорі газотурбінного двигуна з урахуванням перепускання повітря з проточної частини. Представлено сумарні характеристики компресора на різних частотах обертання при відкритих і закритих клапанах перепускання в зіставленні з експериментальними даними. Запропоновано програму регулювання роботи клапану перепускання компресора, що дозволяє при мінімальних значеннях витрати повітря, що проходить через нього, забезпечити необхідний запас газодинамічної стійкості.

Ключові слова: осьовий багатоступінчастий компресор, нерозрахункові режими роботи, чисельне дослідження течії з перепусканням повітря з проточної частини компресора, регулювання роботи клапану перепускання.

**CALCULATION INVESTIGATION OF FLOW IN TURBOSHAFT GTE MULTISTAGE AXIAL
COMPRESSOR AT PARTIAL REGIMES**

L. G. Boyko, A. E. Dyomin, O. D. Degtiariv, U. F. Ahtemenko

Results over of numeral research of axisymmetrical flow are brought in the multi-stage axial compressor of turbo-engine taking into account air bypass from compressor setting. Total characteristic of compressor are presented on different frequencies of rotation at the open and closed valves of bypass in comparison with experimental data. The program of adjusting of work of valve of bypass of compressor, allowing at the minimum values of expense of air passing through it, offers, to provide the necessary supply of gas-dynamic stability

Key words: axial multistage compressor, off-design regimes, numeral research of flow with air bypass from compressor setting, bypass valve work adjusting.

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

Дьомин 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.

Дегтярьов Олег Дмитриевич – старший преподаватель кафедры теории авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: boyko@d2.khai.edu.

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