

УДК 629.03

О.В. КИСЛОВ, Н.В. ПИЖАНКОВА

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

КОНВЕРТИРОВАННЫЙ ГАЗОТУРБИННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПЕРЕПУСКОМ ВОЗДУХА ИЗ КОМПРЕССОРА В СВОБОДНУЮ ТУРБИНУ

Предложена новая схема организации перепуска воздуха в турбовальном конвертированном ГТД. Для обеспечения необходимых запасов устойчивости на пониженных режимах работы использован перепуск воздуха из компрессора низкого давления в тракт силовой турбины. Данный подход позволяет снизить потери мощности по сравнению со случаем, когда перепуск осуществляется в атмосферу. Проведено численное моделирование эксплуатационных характеристик компрессора с двумя способами перепуска: в атмосферу и в тракт силовой турбины. Показана целесообразность использования второго способа. Представлены количественные оценки.

Ключевые слова: турбовальный газотурбинный двигатель, запасы устойчивости, линия рабочих режимов, перепуск воздуха, дроссельные характеристики.

Введение

Конвертированные газотурбинные двигатели (ГТД) нашли широкое применение в качестве газотурбинных приводов газоперекачивающих агрегатов и энергетических установок. В связи с более высокими требованиями к ресурсу наземных ГТД, конвертированные двигатели обычно эксплуатируются на пониженных, по сравнению с прототипом, режимах работы. На этих режимах для обеспечения

устойчивой работы компрессора требуется перепуск воздуха за группой первых ступеней, что приводит к ухудшению экономичности ГТД. В этой связи представляет интерес схема конвертированного ГТД с перепуском воздуха из компрессора в тракт свободной турбины. На рис. 1 представлена схема такого ГТД, содержащего двухвальный газогенератор, свободную турбину, показан перепуск воздуха за компрессором низкого давления в свободную турбину.

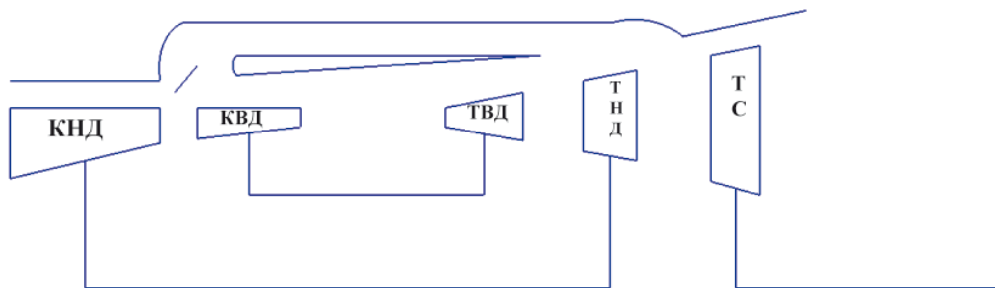


Рис. 1. Схема конвертированного ГТД с перепуском воздуха в свободную турбину

Такая схема может получаться двумя путями:

- конвертацией авиационного турбовального ГТД со свободной турбиной,
- конвертацией ТРДД со смешением потоков путем уменьшения степени двухконтурности и установки свободной турбины и выходного диффузора вместо сопла.

Перепуск воздуха за КНД смещает рабочую линию на характеристике КНД в сторону больших приведенных расходов воздуха $G_{ВПР}$, а возврат перепускаемого воздуха в проточную часть

ГТД перед свободной турбиной увеличивает мощность свободной турбины, что позволяет уменьшить расход топлива G_T для обеспечения заданной мощности ГТД, т.е. улучшить экономичность двигателя.

Дополнительным эффектом от подвода в свободную турбину перепускаемого воздуха является уменьшение степени понижения давления газогенератора.

Для турбовального ГТД с двухвальным газогенератором уменьшение степени понижения давления газогенератора реализуется путем

уменьшения степени понижения давления турбины низкого давления (ТНД) $\pi_{ТНД}^*$ при сохранении постоянной степени понижения давления в турбине высокого давления (ТВД)

$\pi_{ТВД}^* = \text{const}$ (при «запертых» первых сопловых аппаратах ТВД и ТНД). Известно, что такое

изменение $\pi_{ТВД}^*$ и $\pi_{ТНД}^*$ влияет на положение рабочей линии на характеристике КВД и смещает рабочую линию на характеристике КНД на большие приведенные расходы воздуха, т.е. дополнительно увеличивает запас устойчивости КНД [1]. Это делает возможным обеспечить необходимый запас устойчивости КНД при меньшем расходе перепускаемого воздуха, что должно благоприятно сказываться на удельных параметрах ГТД.

Целью настоящей статьи является оценка влияния перепуска воздуха из компрессора в свободную турбину на параметры конвертированного ГТД и его эксплуатационные характеристики.

1. Расчетные соотношения

Решение поставленной задачи получено численным путем. Использовалась математическая модели ТВаД, описания в работе [статья БЛГ, КЕЛ], с ее помощью учтен подвод перепускаемого воздуха в свободную турбину путем изменения баланса расходов в ТНД и свободной турбине:

$$G_{Г\ ТНД} + \Delta G_{охл\ ТНД} + \Delta G_{пер} = G_{Г\ ТС}, \quad (1)$$

где $G_{Г}$ - расход газа на входе в ТНД,

$\Delta G_{охл\ ТНД}$ - расход воздуха из системы охлаждения ТНД,

$\Delta G_{пер}$ - расход перепускаемого воздуха.

В модель введен расчет параметров смеси газа, выходящего из ТНД и перепускаемого воздуха:

$$R_{см} = \frac{R_{Г} + mR_{В}}{1 + m}; \quad (2)$$

$$C_{P\ см} = \frac{C_{PГ} + mC_{PВ}}{1 + m} \quad (3)$$

$$K_{см} = \frac{C_{P\ см}}{C_{P\ см} - R_{см}} \quad (4)$$

$$T_{см}^* = \frac{C_{PГ} T_{ТНД}^* + mC_{PВ} T_{КНД}^*}{C_{P\ см} (1 + m)} \quad (5)$$

$$P_{см}^* = \sigma_{см} \frac{P_{ТНД}^* F_{ТНД}^* + P_{КНД}^* \sigma_{пер} F_{пер}}{F_{ТНД} + F_{пер}} \quad (6)$$

где $m = \frac{G_{пер}}{G_{ТНД}}$, $\sigma_{пер}$ - коэффициент восстановления полного давления в канале для перепуска воздуха, $F_{пер}$ - площадь поперечного сечения канала перепуска воздуха на входе в камеру смешения,

$\sigma_{см}$ - коэффициент восстановления полного давления, учитывающий потери при смешении потоков.

2. Результаты исследований

Для оценки влияния перепуска воздуха из компрессора в свободную турбину на экономичность ГТД и запас устойчивой работы его компрессора выполнен расчет дроссельной характеристики ГТД.

Результаты расчета представлены на рисунке 2.

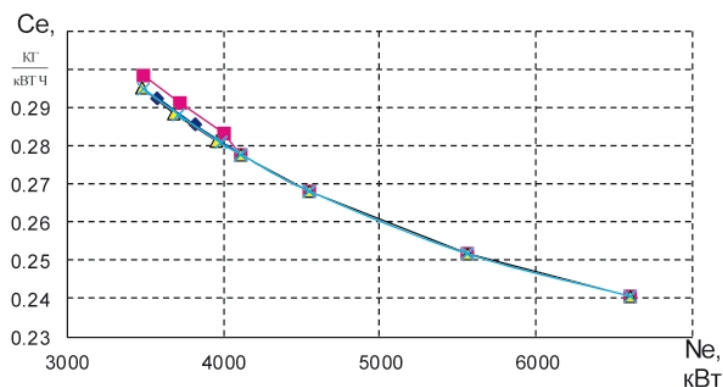


Рис. 2. Дроссельная характеристика ГТД:

- при отсутствии перепуска воздуха; —■— перепуск воздуха из КНД в атмосферу ($\Delta \bar{G}_{пер} = 0,03$);
- ▲— перепуск воздуха из КНД в свободную турбину ($\Delta \bar{G}_{пер} = 0,03$);
- перепуск воздуха из КНД в свободную турбину ($\Delta \bar{G}_{пер} = 0,022$)

Рисунок 3 иллюстрирует изменение запаса устойчивости компрессора в исходном ГТД, при наличии перепуска в атмосферу $\Delta \bar{G} = 0,03$ и при двух различных расходах перепускаемого воздуха ($\Delta \bar{G}_{\text{ПЕР}} = 0,03$ и $0,022$). Величина $\Delta \bar{G}_{\text{ПЕР}}$ определяется как отношение $\Delta \bar{G}_{\text{ПЕР}}$ к расходу воздуха на входе в КНД. Условные обозначения на рис. 3 и последующих соответствуют обозначениям на рис. 2.

На рис. 4 представлены рабочие линии на характеристике КНД. При отсутствии перепуска воздуха из КНД запас устойчивости КНД становится меньше 10% при относительной приведенной частоте вращения $\bar{n}_{\text{ндпр}} \leq 90\%$. Перепуск 3% воздуха в атмосферу из-за КНД приводит к смещению рабочей линии на характеристиках КНД в сторону больших приведенных расходов воздуха $G_{\text{в пр}}$, следствием чего является увеличение запаса устойчивости КНД до $\Delta K_{y \text{нд}} \geq 10\%$ при $\bar{n}_{\text{ндпр}} > 87\%$.

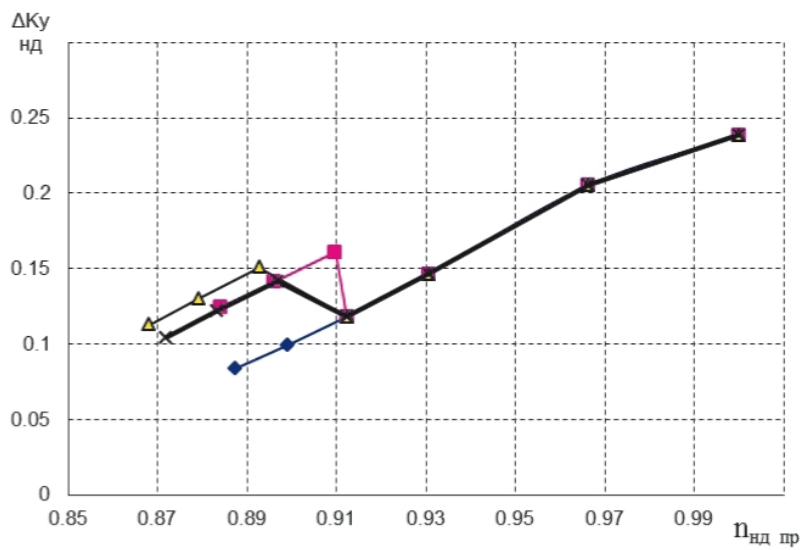


Рис. 3. Изменение запаса устойчивости КНД

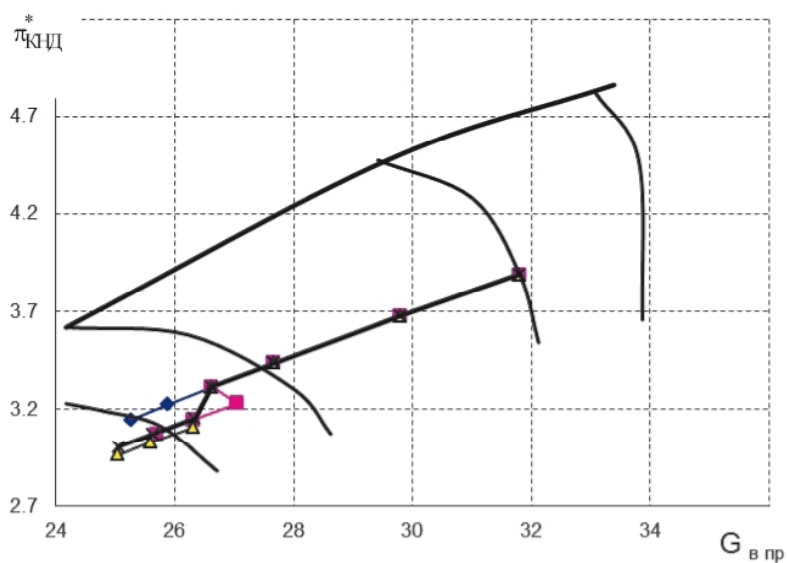


Рис. 4. Рабочая линия на характеристике КНД

Платой за увеличение запаса устойчивости КНД является ухудшение экономичности ГТД - удельный расход топлива C_e увеличивается.

При перепуске того же количества воздуха из КНД в свободную турбину дроссельная характеристика в координатах $C_e - N_e$ практически совпадает с дроссельной характеристикой ГТД при отсутствии перепуска. Однако смещение рабочей линии на характеристике КНД больше,

чем при перепуске воздуха в атмосферу, что обеспечивает еще большее увеличение $\Delta K_{y \text{ нд}}$ (рис. 4). Большее смещение рабочей линии объясняется снижением степени понижения давления в ТНД (рис. 5), что требует для обеспечения заданной мощности N_e увеличения режима работы каскада высокого давления - $n_{\text{ВВД пр}}$ и $G_{\text{ВВД пр}}$, т. е. раздросселирование канала за КНД.

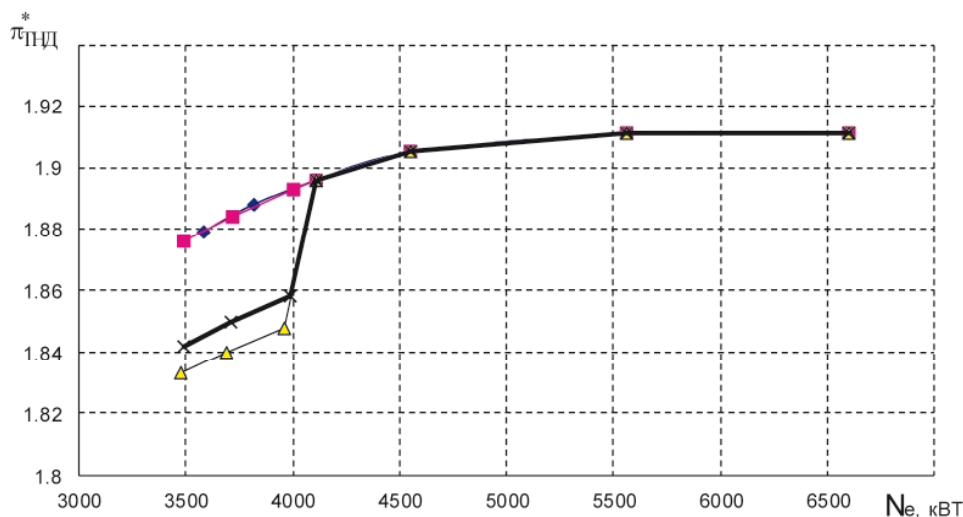


Рис. 5. Изменение $\pi_{\text{ТНД}}^*$ в зависимости от мощности

Поэтому при обеспечении одинаковой мощности режим работы ГТД с перепуском воздуха из компрессора в свободную турбину отличается от режима работы ГТД без перепуска более

высокими значениями T_{Γ}^* , $n_{\text{вн}}$. На рис. 6, 7 показано как изменяются значения температуры газа при различных вариантах перепуска и относительной приведенной частоты вращения ротора высокого давления.

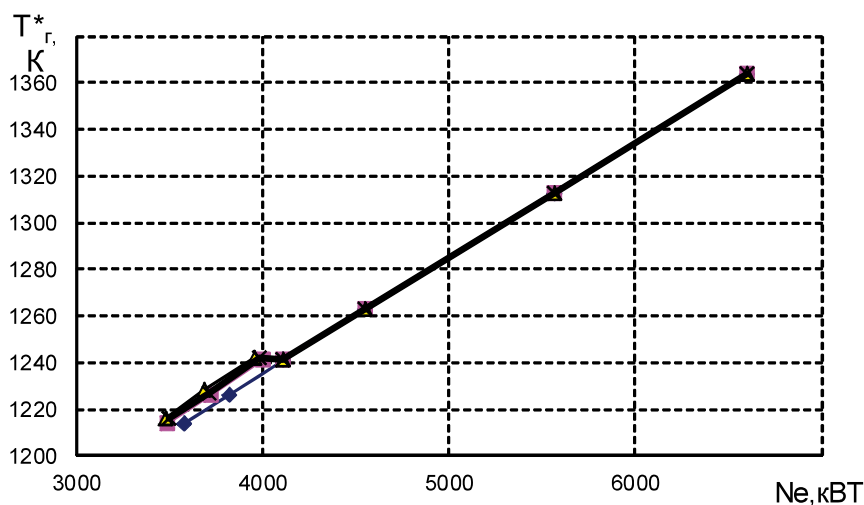


Рис. 6. Зависимость T_{Γ}^* от мощности ГТД

На основе сравнения ΔK_{yHD} при перепуске воздуха за КНД в атмосферу и в свободную турбину, сделан вывод, о возможности обеспечения заданного уровня ΔK_y при перепуске воздуха их компрессора в свободную турбину при меньшем расходе перепускаемого воздуха по сравнению с перепуском воздуха в атмосферу.

В частности с помощью математической модели, получено, что заданный уровень ΔK_{yHD} обеспечивается при меньшем расходе перепускаемого воздуха в тракт свободной турбины по сравнению со случаем перепуска в атмосферу.

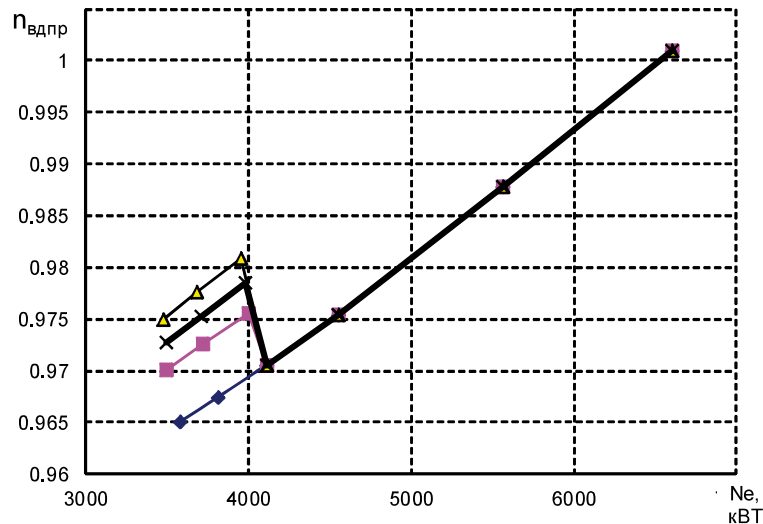


Рис. 7. Изменение относительной приведенной частоты вращения ротора высокого давления от мощности ГТД

Заключение

В статье проведена оценка влияния перепуска воздуха из компрессора ГТД в свободную турбину на его эксплуатационные характеристики. Показано, что такой перепуск воздуха позволяет получить запасы устойчивости КНД, равные запасам при перепуске воздуха из компрессора в атмосферу, при этом меньшем расходе перепускаемого воздуха. Дроссельная характеристика двигателя в этом случае практически совпадает с его дроссельной характеристикой без перепуска воздуха.

Необходимо отметить, что возможно улучшение дроссельной характеристики ГТД за счет оптимизации давления и расхода перепускаемого воздуха.

Представленные результаты получены при превышении давления перепускаемого воздуха над давлением перед свободной турбиной в 1,34-1,43 раза.

Литература

1. Бойко Л. Г. Метод расчета газотермодинамических параметров ГТД с повенцовым описанием осевого многоступенчатого компрессора [Текст] / Л. Г. Бойко, Е. Л. Карпенко, Ю. Ф. Ахтеменко // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2013. – Вып. 3. – С. 31-40.
2. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок [Текст] / В.В.Кулагин, С.К.Бочкарев, И.М.Горюнов и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 464 с.

Поступила в редакцию 12.05.2017 г.

О.В. Кіслов, Н.В. Піжанкова. Конвертований газотурбінний двигун із перепуском повітря з компресора до вільної турбіни

Запропоновано нову схему організації перепуску повітря у турбовальному конвертованому ГТД. Для забезпечення необхідних запасів стійкості на знижених режимах роботи використано перепуск повітря з компресора низького тиску до тракту силової турбіни. Цей підхід дозволяє знизити втрати потужності у порівнянні з випадком, коли перепуск йде до атмосфери. Проведено чисельне моделювання експлуатаційних характеристик компресора із двома способами перепуску: до атмосфери та до тракту силової турбіни. Показано доцільність використання другого способу. Наведено кількісні оцінки.

Ключові слова: турбовальний газотурбінний двигун, газогенератор, запаси стійкості, лінія робочих режимів, перепуск повітря, дросельні характеристики.

O.V. Kislov, N.V. Pizhankova Converted gas turbine engine with compressor air bleed to free turbine

A new scheme of the air bleed in aeroderivative turboshaft GTE is proposed. To ensure the necessary stability margins on operating conditions with reduced rotational speed, air bleed from low-pressure compressor to power turbine flow path is used. This approach allows to reduce power losses in comparison with the case when air bleed is directed out into the atmosphere. Numerical modeling of compressor operating performance with two ways of bypassing (into the atmosphere and into power turbine flow path) has been carried out. The expediency of using of the second method is shown, quantitative estimates are presented.

Keywords: gas turbine engine, gas generator, gas generator characteristics, free operation, internal efficiency, relative internal efficiency, thermal efficiency.