

УДК 629.7.036

А.И. ГАРКУША, В.С. ЧИГРИН

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ТУРБИНЫ С РЕГУЛИРУЕМЫМ СОПЛОВЫМ АППАРАТОМ**

*Проведена оценка эффективности использования в турбине ГТД регулируемого соплового аппарата (РСА). Применительно к двигателям силовой установки сверхзвуковых многорежимных самолётов управление сопловыми аппаратами турбины, наряду с управлением другими элементами позволяет несколько повысить тягу на максимальном и форсированном режимах при сверхзвуковых скоростях полёта и улучшить экономичность двигателя на дроссельных режимах. На энергетических и газотранспортных ГТД достигается значительный положительный эффект от применения РСА в одно и двухступенчатых силовых турбинах по тепловой экономичности установки на частичных нагрузках. Наряду с этим, по данным приведенным в ряде работ изменение площади проходного сечения соплового аппарата ( $F_{CA}$ ) турбины приводит к снижению КПД турбины. Для получения эффекта от регулирования  $F_{CA}$  необходимы специальные подходы при проектировании турбины. Для турбин, у которых регулирование площади соплового аппарата связано с её увеличением по сравнению с расчетным значением, можно рекомендовать пониженные значения степени реактивности на расчетном режиме ( $\rho_p$ ). А для турбин, у которых регулирование  $F_{CA}$  связано с её уменьшением, можно рекомендовать повышенные значения  $\rho_p$ .*

**Ключевые слова:** регулируемый сопловой аппарат турбины, площадь проходного сечения соплового аппарата, степени реактивности, КПД турбины.

**Введение**

Одним из перспективных направлений улучшения характеристик ГТД является использование в турбине двигателя регулируемого соплового аппарата (РСА). Изменение проходной площади соплового аппарата, осуществляемое путем поворота сопловых лопаток, позволяет регулировать расход рабочего тела через турбину и её мощность.

Применительно к двигателям силовой установки сверхзвуковых многорежимных самолётов управление сопловыми аппаратами турбины, наряду с управлением другими элементами позволяет несколько повысить тягу на максимальном и форсированном режимах при сверхзвуковых скоростях полёта и улучшить экономичность двигателя на дроссельных режимах за счёт оптимизации параметров рабочего процесса и снижения потерь [1]. Такие двигатели получили название двигатели с изменяемым рабочим процессом (ДИП). В настоящее время наиболее изученными являются характеристики ДИП на основе традиционных схем турбореактивный двухконтурный двигатель с форсажем (ТРДДФ), имеющих развитое управление элементами проточной части.

Первый полноценный ДИП продемонстрированный фирмой «Дженерал-Электрик» показал

улучшение топливной экономичности на перегонной дальности на дозвуковом режиме на 8 %.

На энергетических и газотранспортных ГТД достигается значительный положительный эффект от применения РСА в одно и двухступенчатых силовых турбинах.

На энергетических ГТД РСА поддерживает постоянным частоту вращения вала, обеспечивая тем самым более высокую мощность в летнее время и при снижении КПД турбомашин вследствие эксплуатационных воздействий. Регенерация теплоты, главный резерв повышения эффективности ГТУ стационарного типа, дает максимальный эффект при использовании регулируемых силовых турбин с реализацией программы управления  $T_r^* = \text{const}$ . В климатических условиях средней полосы Украины и России такая программа управления обеспечивает около 4 % экономии топлива. Регулируемый сопловой аппарат в ряде случаев дает значительные преимущества по тепловой экономичности установки на частичных нагрузках.

На транспортных ГТД РСА свободной турбины (СТ) ограничивает частоту ее вращения и предотвращает заброс оборотов при переключении передач. Использование регулируемого соплового аппарата дает возможность организовать переменные режимы транспортного газотурбинного двигателя

по двум законам: постоянства температуры газа, постоянства оборотов установки. Сохранение при частичных нагрузках постоянной температуры обеспечивает повышение экономичности двигателя, а сохранение постоянных оборотов на частичных режимах значительно улучшает приемистость двигателя [2].

Несмотря на широкие возможности применения регулируемых сопловых аппаратов, до сих пор нет достаточно полных исследований того комплекса проблем, который возникает при использовании поворотных сопловых лопаток.

Основными причинами ограниченного использования РСА в СТ энергетических и газотранспортных ГТД является суждение о повышенной сложности механизма поворота лопаток, уплотнений и недостаточной надежности работы таких лопаток.

### Эффективность турбины с использованием РСА

Важной причиной отказа от применения РСА в турбинах ГТД являются данные о пониженной эффективности регулируемых ступеней осевых турбин вследствие, вызывающих дополнительные потери, изменения углов атаки рабочих лопаток, осевых межвенцовых и радиальных зазоров в РСА.

По данным приведенным в работе [3] уменьшение приведенного расхода на 10% может примерно на 2% снизить КПД турбины (рис.1).

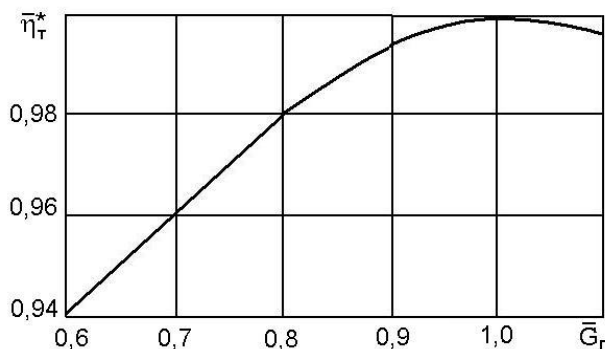


Рис. 1. Изменение КПД турбины при изменении приведенного расхода газа

Однако при надлежащем выборе геометрических и газодинамических параметров регулируемых ступеней и соответствующей конструкции (со сферическими меридиональными обводами и подпружиненными сопловыми лопатками для ликвидации радиальных зазоров) РСА обеспечивают высокую эффективность, что подтверждается многочисленными их испытаниями и расчетными исследованиями.

Для регулируемой ступени при сферических меридиональных обводах и отсутствии радиальных зазоров в соплах РСА важно влияние потерь энергии, связанных с изменением угла атаки рабочих лопаток.

На рис. 2 приведены результаты вычисления относительного КПД на расчетном (номинальном) режиме в зависимости от относительной площади выходного сечения РСА [4]. Видно, что уменьшение проходного сечения соплового аппарата дает некоторый рост КПД, а его увеличение — вызывает снижение КПД. Небольшое снижение потерь энергии при уменьшении проходного сечения РСА связано с изменением кинематики потока.

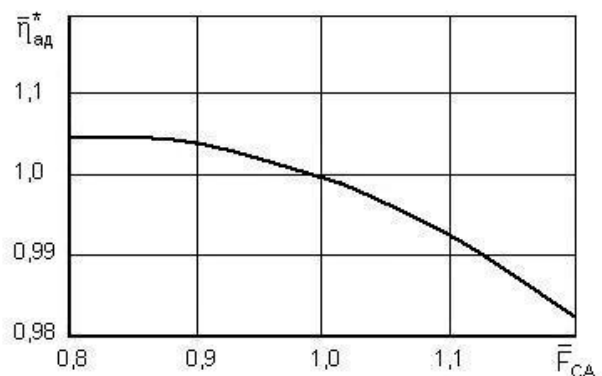


Рис. 2. Изменение КПД турбины при изменении площади проходного сечения РСА

При прикрытии РСА и поддержании постоянной частоты вращения, убывают осевая составляющая скорости потока, относительные скорости на входе и абсолютная скорость на выходе, т.е. все значения скоростей и связанные с ними потери энергии.

Потери со снижением скорости значительно снижаются, посколькукрытие площади соплового аппарата на 10...15% для большинства первых ступеней многоступенчатых СТ сопровождается приближением значения угла выхода потока из ступени к  $90^\circ$ .

Исследования турбинной ступени с регулируемым сопловым аппаратом показывают, что при отклонении угла выхода потока из соплового аппарата от оптимального значения наблюдается существенное снижение КПД [4].

### Особенности проектирования турбины с РСА

Отличие данных приводимых разными авторами [3 – 5] о КПД турбины с РСА свидетельствует о том, что эффективность турбины существенно зависит от параметров заложенных при проектировании.

Для оценки влияния управления сопловыми аппаратами турбины на характеристики ТРДДФ было проведено расчетное исследование применительно к серийному двигателю.

Результаты расчетов показывают, что увеличение площади проходного сечения соплового аппарата ( $F_{CA}$ ) турбины высокого давления на 10 % позволяет снизить удельный расход топлива на форсажных режимах до 2 % [6].

Малый эффект от управления  $F_{CA}$  объясняется слабой способностью турбины к увеличению работы при увеличении  $F_{CA}$ .

В теории газовых турбин [7] способность турбины увеличивать мощность при увеличении степени понижения давления ( $\pi_T$ ) характеризуется коэффициентом запаса работы:

$$K_L = L_{T \max} / L_{Tr},$$

который показывает во сколько раз можно увеличивать работу турбины при увеличении  $\pi_T$  от расчетного значения до предела расширительной способности турбины. На рис. 3 показана зависимость коэффициента запаса работы одноступенчатой турбины от площади проходного сечения соплового аппарата, рассчитанного по методике [8]. Видно, что с увеличением  $F_{CA}$  способность турбины к увеличению работы резко уменьшается. Это объясняется увеличением степени реактивности турбины (рис. 3) и уменьшением расширительных возможностей соплового аппарата (СА).

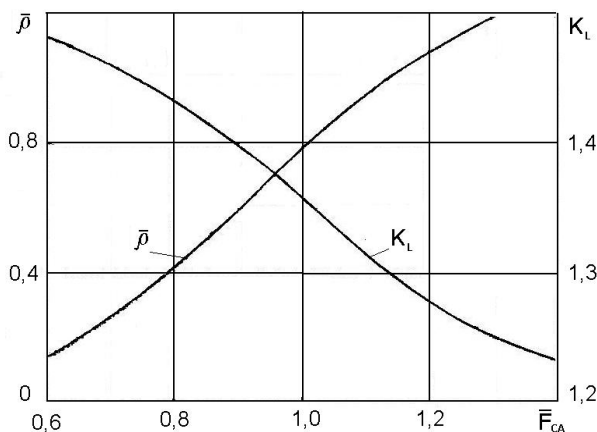


Рис. 3. Изменение степени реактивности и коэффициента запаса работы турбины при изменении площади проходного сечения РСА

Таким образом, для получения эффекта от регулирования  $F_{CA}$  необходимы специальные подходы при проектировании турбины. Для турбин, у которых регулирование площади СА связано с её увеличением по сравнению с расчетным значением, можно рекомендовать пониженные значения

степени реактивности на расчетном режиме ( $\rho_p$ ). Это позволит сохранить высокую способность турбины к увеличению работы при регулировании СА. А для турбин, у которых регулирование площади СА связано с её уменьшением, можно рекомендовать повышение значения  $\rho_p$ . В этом случае степень реактивности будет оставаться положительной в более широком диапазоне регулирования СА, что позволит избежать дополнительных потерь, обусловленных отрицательной степенью реактивности и ухудшения эффективности турбины [1].

## Заключение

Выбор параметров турбин с РСА должен тесно увязываться с задачами управления, а следовательно с потребным диапазоном изменения площади сопловых аппаратов. В частности, на энергетических ГТД у которых регулирование связано с увеличением площади СА можно рекомендовать пониженные значения степени реактивности на расчетном режиме.

## Литература

1. Нечаев Ю.И. Авиационные турбореактивные двигатели с изменяемым рабочим процессом для многорежимных самолётов / Ю.И. Нечаев, В.Н. Кобельков, А.С. Полев. – М.: Машиностроение, 1988. – 172 с.
2. Арсеньев Л.В. Улучшение статических и динамических свойств транспортных ГТУ с помощью регулируемого соплового аппарата / Л.В. Арсеньев, А. Кантор, К.В. Орлов. – Тр. ЛПИ, 1962. – Т. 232. – С. 26-30.
3. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / Под ред. В.А. Сосунова, В.М. Чепкина. – М.: МАИ, 2003. – С. 144-145.
4. Комаров О.В. Эффективность применения регулируемых силовых турбин в газотурбинных установках и двигателях регенеративного и простого циклов / О.В. Комаров, Б.С. Ревзин, Ю.М. Бродов // Теплоэнергетика. – 2006. – № 2. – С. 73-77.
5. Холщевников К. В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин / К.В. Холщевников, О.Н. Емин, В.Н. Митрохин. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
6. Бабич О.В. Улучшение характеристик ТРДДФ за счет регулирования сопловых аппаратов турбины / О.В. Бабич, А.И. Гаркуша // Интегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ'2008, «ХАИ»: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Х., 2008. – С. 159.
7. Абианц В.Х. Теория авиационных газовых турбин / В.Х. Абианц. – М.: Машиностроение, 1979. – 246 с.

8. Кобельков В.Н. Методика расчёта характеристик регулируемой газовой турбины в широком диапазоне режимов работы / В.Н. Кобельков, А.Н. Литвяк // Научн.-метод. материалы по процес-

сам и характеристикам авиационных двигателей: сб. ст. // ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского – М., 1985. – С. 50-61.

Поступила в редакцию 22.03.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. научн. сотрудник В.В. Логинов, Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Украина.

### ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ТУРБИНИ З КЕРОВАНИМ СОПЛОВИМ АПАРАТОМ

*О.І. Гаркуша, В.С. Чигрин*

Проведена оцінка ефективності використання в турбіні ГТД регульованого соплового апарату (РСА). Стосовно до двигунів силової установки надзвукових багато режимних літаків управління сопловими апаратами турбіни, поряд з керуванням іншими елементами дозволяє трохи підвищити тягу на максимальному і форсованому режимах при надзвукових швидкостях польоту і поліпшити економічність двигуна на дросельних режимах. На енергетичних і газотранспортних ГТД досягається значний позитивний ефект від застосування РСА в одні і двоступеневих силових турбінах з теплової економічності установки на часткових навантаженнях. Поряд з цим, за даними наведеним у ряді робіт зміна площі прохідного перерізу соплового апарату ( $F_{CA}$ ) турбіни призводить до зниження ККД турбіни. Для отримання ефекту від регулювання  $F_{CA}$  необхідні спеціальні підходи при проектуванні турбіни. Для турбін, у яких регулювання площі соплового апарату пов'язано з її збільшенням в порівнянні з розрахунковим значенням, можна рекомендувати знижені значення ступеня реактивності на розрахунковому режимі ( $\rho_p$ ). А для турбін, у яких регулювання  $F_{CA}$  пов'язано з її зменшенням їм, можна рекомендувати підвищені значення  $\rho_p$ .

**Ключові слова:** регульований сопловий апарат турбіни, площа прохідного перерізу соплового апарату, ступень реактивності, ККД турбіни.

### SELECTION OF PARAMETERS TURBINE WITH CONTROLLED NOZZLE ASSEMBLY

*A.I. Garkusha, V.S. Chigrin*

Describes the effect of use on gas turbine engine turbine with variable area nozzles of turbine stage. For engines multimode supersonic aircraft variable area nozzles of turbine stage, along with other controls will slightly increase maximum thrust to forced operation at supersonic flight speeds and efficiency of the engine at low regimes. To energy and transportation gas turbine engine achieved a significant positive effect from the use of variable area nozzles of turbine stage in one and two-stage power turbine. Thermal efficiency of the installation at partial load increases. Along with this, according to data provided in a number of works by changing the area nozzles of turbine stage reduces the efficiency of the turbine. To obtain the effect of variable area nozzles of turbine stage regulation requires special approaches when designing the turbine. For turbines, which regulate the area nozzles of turbine stage associated with an increase in comparison with the calculated value, we can recommend reduced the degree of reactivity on a design mode. And for the turbines, which control area nozzles of turbine stage is associated with its decrease we can recommend higher values of the degree of reactivity.

**Key words:** variable area nozzles of turbine stage, area nozzles of turbine, the degree of reactivity, the efficiency of the turbine.

**Гаркуша Александр Иванович** – канд. техн. наук, доцент кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: algar@vk.kharkov.ua.

**Чигрин Валентин Семенович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: chigrin\_vs@rambler.ru.