

УДК 629.735

О.В. КИСЛОВ, Н.И. ПОПОВИЧ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОТРЕБНОЙ МОЩНОСТИ НАЗЕМНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ПРИВОДА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ АТМОСФЕРЫ**

*Рассмотрены законы регулирования турбовального двигателя со свободной турбиной и впрыском пара в камеру сгорания с точки зрения топливной экономичности и ресурса. Показано, что при увеличении температуры атмосферы с помощью увеличения расхода пара можно обеспечить неизменность мощности и уменьшение удельного расхода топлива газотурбинного привода (ГТП). Недостатком такого способа является уменьшение минимального коэффициента запаса прочности рабочей лопатки турбины. Предложен новый способ обеспечения потребной мощности ГТП, заключающийся в проектировании турбины компрессора с пониженными значениями степени понижения давления. В таком ГТП на расчетном режиме для обеспечения балансов мощностей компрессоров и турбин требуется подача пара. В расчетных условиях при максимальных значениях частоты вращения ротора и температуры газа перед турбиной такой ГТП имеет избыточную мощность, поэтому он должен эксплуатироваться на дроссельных режимах. Если режим работы ГТП понижать путем уменьшения расхода топлива при сохранении расхода пара, то достигается улучшение экономичности ГТП (до 12%) и увеличение минимального коэффициента запаса прочности рабочей лопатки турбины (до 18%).*

**Ключевые слова:** газотурбинный привод (ГТП), впрыск воды в камеру сгорания, удельный расход топлива, расход пара, закон регулирования, коэффициент запаса прочности.

**Введение**

Газотурбинные приводы широко применяются в энергетике и в составе газоперекачивающих агрегатов. Как известно [1], при увеличении температуры атмосферы мощность ГТП уменьшается, поэтому актуален вопрос обеспечения потребной мощности ГТП в регионах с жарким климатом. Известен ряд способов решения этого вопроса [2]. Во-первых, создание перегазованных ГТП простого цикла, имеющих при стандартных атмосферных условиях избыточную мощность на максимальном режиме. В нормальных условиях эти ГТП эксплуатируются на дроссельных режимах, что ухудшает их экономичность. Во-вторых, уменьшение температуры воздуха перед компрессором путем его охлаждения в теплообменнике или впрыском воды. В-третьих, впрыск водяного пара в камеру сгорания. Для увеличения мощности ГТП обычно требуется увеличение расхода пара.

В работе [2] рассмотрен такой способ обеспечения потребной мощности ГТП путем впрыска пара в камеру сгорания и показано, что в ГТП со свободной турбиной для увеличения мощности требуется увеличение частоты вращения ротора турбокомпрессора. Увеличение частоты вращения негативно сказывается на ресурсе ГТП вследствие роста центробежных и газовых сил. С другой стороны, при увеличении расхода пара понижается температура газа перед турбиной  $T_r^*$ . Это частично компен-

сирует негативное влияние роста частоты вращения. Косвенно влияние этих двух противоположно влияющих на ресурс ГТП факторов может быть оценено по коэффициенту запаса прочности рабочих лопаток и дисков рабочих колес турбины компрессора. Очевидно, что уменьшение коэффициента запаса прочности неприемлемо для наземных ГТП и требует изменения способа применения пара.

**Целью данной работы** является оценка возможности обеспечения потребной мощности ГТП при повышенных температурах атмосферы путем впрыска пара в камеру сгорания и разработка мероприятий по повышению эффективности решения поставленной задачи с точки зрения топливной экономичности и ресурса ГТП.

**1. Математическая модель турбовального двигателя со свободной турбиной и впрыском пара в камеру сгорания**

Объектом исследования является ГТП с двухвальным газогенератором, свободной турбиной и расчетными температурой газов перед турбиной  $T_{гр}^* = 1370\text{K}$ , степенью повышения давления в компрессоре  $\pi_{кр}^* = 21,1$  и мощностью  $N_{ер} = 10,2\text{МВт}$ .

Математическая модель турбовального ГТП описана в [1]. Впрыск пара в камеру сгорания добавляет одну неизвестную в систему уравнений  $G_{п}$ .

Такой ГТД имеет два регулирующих фактора (секундный расход топлива  $G_T$  и секундный расход пара  $G_{\Pi}$ ), поэтому программа управления ГТД - двухпараметрическая.

### 2. Анализ полученных результатов

Вначале была оценена программа регулирования ГТП, обеспечивающая поддержание неизменной мощности  $N_e = 10,2 \text{ МВт}$  при повышении полной температуры воздуха  $T_B^*$ . Закон изменения второго регулируемого параметра  $n_{ВД}$  показан на рис.1. Частота вращения ротора высокого давления  $n_{ВД}$  должна расти при увеличении  $T_B^*$  для получения дополнительной мощности за счет впрыска пара в камеру сгорания. Иначе, при  $n_{ВД} = \text{const}$  и малом изменении мощности компрессора высокого давления  $N_{КВД}$ , положительный эффект от впрыска пара - увеличение теплоемкости и расхода газа в турбине должен компенсироваться уменьшением  $T_G^*$  для обеспечения баланса мощностей  $N_{КВД} = N_{ТВД}$ . При чем, чем больше расход пара  $G_{\Pi}$ , тем сильнее уменьшение  $T_G^*$ .

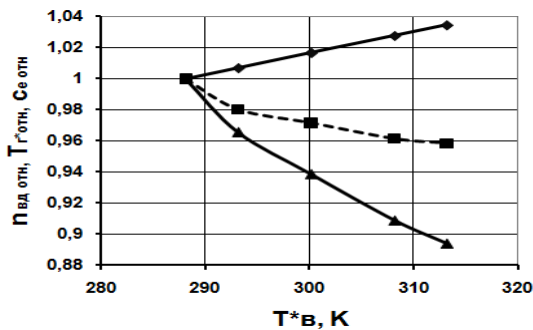


Рис.1. Зависимости относительных  $n_{ВД}$ ,  $T_G^*$  и  $c_e$  от температуры воздуха на входе в ГТП  $T_B^*$ :

◆  $n_{ВД \text{ отн}}$ ; ■  $T_G^* \text{ отн}$ ; ▲  $c_e \text{ отн}$

На этом же рис.1 приведены полученные зависимости  $T_G^* = f(T_B^*)$ ,  $c_e = f(T_B^*)$ , а на рис. 2 - зависимости потребного расхода пара  $\bar{G}_{\Pi} = f(T_B^*)$ .

Как видно, в отличие от ГТП простого цикла, впрыск пара в камеру сгорания приводит к улучшению экономичности ГТП, несмотря на рост температуры  $T_B^*$ . Противоположное влияние на ресурс ГТП увеличения  $n_{ВД}$  и уменьшения  $T_G^*$  оценено с помощью коэффициента запаса прочности рабочей лопатки ТВД [3].

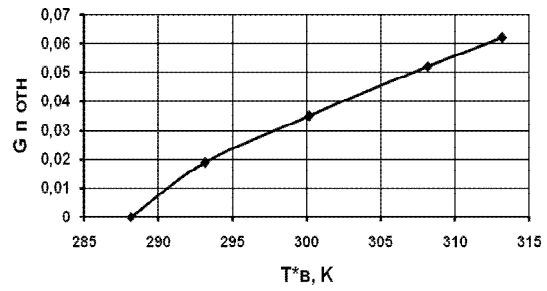


Рис. 2. Зависимости  $\bar{G}_{\Pi}$  от температуры воздуха на входе в ГТП  $T_B^*$

Из представленных на рис. 3 результатов расчета следует, что минимальный коэффициент запаса прочности, хотя и незначительно, но уменьшается, что для стационарных наземных ГТП нежелательно.

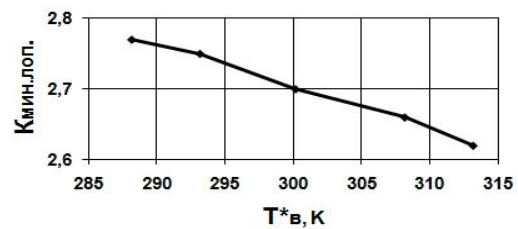


Рис. 3. Зависимость минимального коэффициента запаса прочности от  $T_B^*$

Вследствие неблагоприятного изменения минимального коэффициента запаса прочности по  $T_B^*$ , были оценены другие способы поддержания заданного значения мощности ГТП.

В частности, предлагается применить турбины компрессора с пониженными значениями степени понижения давления. Так как компрессор остается тем же, то в стандартных условиях для обеспечения балансов мощностей компрессоров и турбин при расчетных значениях частот вращения роторов и температуры газа перед турбиной требуется подача пара в камеру сгорания.

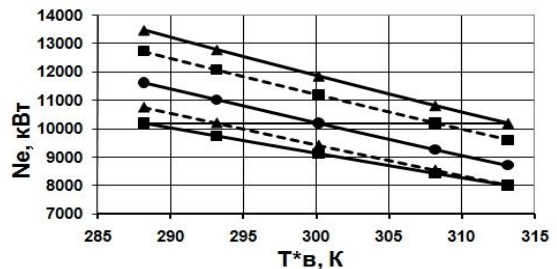


Рис. 4. Зависимости  $N_e$  ГТП со впрыском пара от  $T_B^*$  при разных значениях  $\pi_{ТК}^* = \pi_{ТВД}^* \cdot \pi_{ТНД}^*$ :  
 ■  $\pi_{ТВД1}^* = 2,874$ ,  $\pi_{ТНД1}^* = 1,974$ ; -▲-  $\pi_{ТВД2}^* = 2,82$ ,  $\pi_{ТНД2}^* = 1,94$ ; ●  $\pi_{ТВД3}^* = 2,73$ ,  $\pi_{ТНД3}^* = 1,9$ ;  
 -■-  $\pi_{ТВД4}^* = 2,64$ ,  $\pi_{ТНД4}^* = 1,85$ ; ▲  $\pi_{ТВД5}^* = 2,58$ ,  $\pi_{ТНД5}^* = 1,82$ ; —  $N_e \text{ потр}$

На рис. 4 показано изменение мощности в зависимости от  $T_B^*$  при максимальных значениях частоты вращения ротора высокого давления и температуры газа перед турбиной.

На рис. 5 показаны потребные для реализации такого закона регулирования относительные расходы пара. Из представленных результатов расчета видно, что при невысоких температурах атмосферы ГТП имеет избыточную мощность, поэтому он должен эксплуатироваться на пониженных режимах работы.

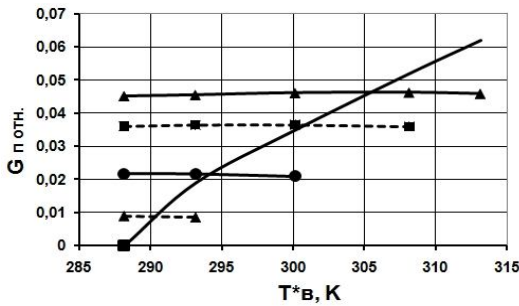


Рис. 5. Зависимость  $\bar{G}_п$  от  $T_B^*$  при разных способах проектирования турбины:

—  $\pi_{TK1}^*$ ; —  $\pi_{TK2}^*$ ; —  $\pi_{TK3}^*$ ; —  $\pi_{TK4}^*$ ; —  $\pi_{TK5}^*$ ; — при раскрутке роторов турбокомпрессоров

Если дросселировать ГТП путем уменьшения расхода топлива при сохранении относительного расхода пара, то уменьшаются частоты вращения роторов и температура газов перед турбиной. На рис. 6, 7, 8 представлены зависимости  $n_{вд}$ ,  $T_T^*$  и удельного расхода топлива от  $T_B^*$ .

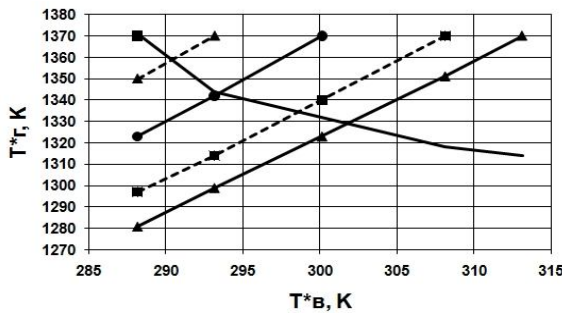


Рис. 6. Зависимости  $T_T^*$  ГТП со впрыском пара от  $T_B^*$  при разных значениях  $\pi_{TK}^*$ :

—  $\pi_{TK1}^*$ ; —  $\pi_{TK2}^*$ ; —  $\pi_{TK3}^*$ ; —  $\pi_{TK4}^*$ ; —  $\pi_{TK5}^*$ ; — при раскрутке роторов турбокомпрессоров

Очевидно, что использование турбин компрессоров с пониженными значениями степени понижения давления улучшает экономичность и уменьшает механические и тепловые нагрузки на элементы турбины. Последнее приводит к увеличению минимального значения коэффициента запаса прочности, что иллюстрируется результатами расчета, представленными на рис. 9.

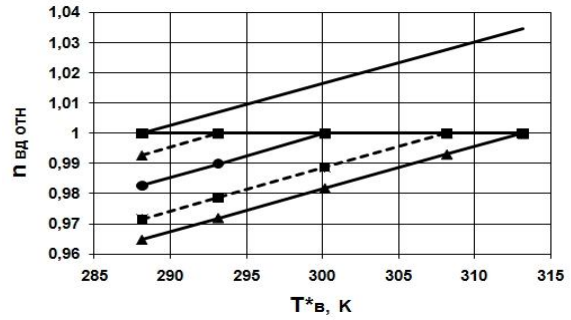


Рис. 7. Зависимости  $n_{вд}$  ГТП со впрыском пара от  $T_B^*$  при разных значениях  $\pi_{TK}^*$ :

—  $\pi_{TK1}^*$ ; —  $\pi_{TK2}^*$ ; —  $\pi_{TK3}^*$ ; —  $\pi_{TK4}^*$ ; —  $\pi_{TK5}^*$ ; — при раскрутке роторов турбокомпрессоров

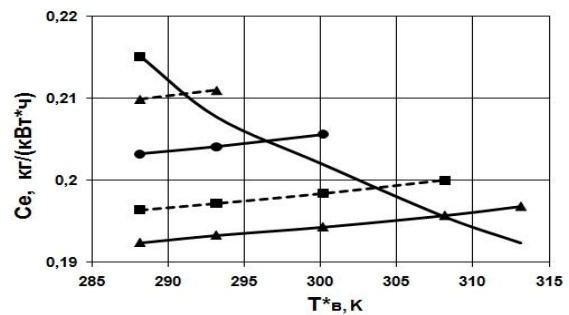


Рис. 8. Зависимости  $c_e$  ГТП со впрыском пара от  $T_B^*$  при разных значениях  $\pi_{TK}^*$ :

—  $\pi_{TK1}^*$ ; —  $\pi_{TK2}^*$ ; —  $\pi_{TK3}^*$ ; —  $\pi_{TK4}^*$ ; —  $\pi_{TK5}^*$ ; — при раскрутке роторов турбокомпрессоров

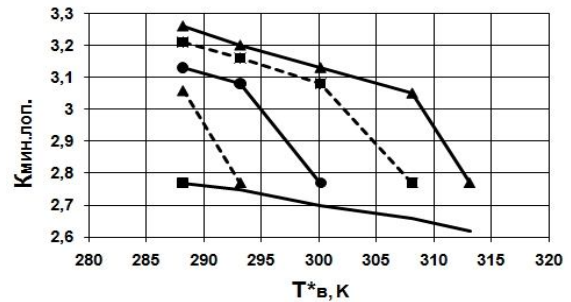


Рис. 9. Зависимость минимального коэффициента запаса прочности от  $T_B^*$  при разных значениях  $\pi_{TK}^*$ :

—  $\pi_{TK1}^*$ ; —  $\pi_{TK2}^*$ ; —  $\pi_{TK3}^*$ ; —  $\pi_{TK4}^*$ ; —  $\pi_{TK5}^*$ ; — при раскрутке роторов турбокомпрессоров

### Заключение

В работе выполнено сравнение различных способов обеспечения потребной мощности ГТП при повышенных температурах атмосферного воздуха с помощью впрыска пара в камеру сгорания. Показано, что для наземных ГТП целесообразно применять турбины компрессора с пониженными значениями степени понижения давления. Это позволяет не только уменьшить удель-

ный расход топлива (до 12%), но и увеличить минимальный коэффициент запаса прочности рабочей лопатки турбины (до 18%), а значит обеспечить больший ресурс ГТП.

### Литература

1. Теория двухконтурных турбореактивных двигателей / В.П. Деменченко, Л.Н. Дружинин, А.Л. Пар-

хомов и др.; под ред. С.М. Шляхтенко, В.А. Соунова. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

2. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения / Е.А. Гриценко, В.П. Данильченко, С.В. Лукачев и др. – Самара: СНЦ РАН, 2004. – 266 с.

3. Скубачевский Г. С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей : учебник / Г.С. Скубачевский. – М.: Машиностроение, 1981. – 552 с.

Поступила в редакцию 16.03.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры теории авиационных двигателей В.П. Герасименко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ НАЗЕМНОГО ГАЗОТУРБІННОГО ПРИВОДУ ПРИ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ АТМОСФЕРИ

*О.В. Кіслов, Н.І. Попович*

Розглянуто закони регулювання турбовального двигуна з вільною турбіною і вприском пари у камеру згорання з точки зору паливної економічності та ресурсу ГТП. Показано, що при збільшенні температури атмосфери за допомогою збільшення витрат пари можна забезпечити незмінність потужності та зменшення питомих витрат палива ГТП. Недоліком такого способу є зменшення мінімального коефіцієнта запаса міцності робочої лопатки турбіни. Запропоновано новий спосіб забезпечення потрібної потужності ГТП шляхом проектування турбіни компресора зі зменшеними величинами ступенів зниження тиску. У такому ГТП на розрахунковому режимі для забезпечення балансів потужності компресорів та турбін потрібна подача пари. В розрахункових умовах при максимальних значеннях частоти обертання ротора та температури газу перед турбіною такий ГТП має надлишкову потужність, тому повинен експлуатуватися на дросельних режимах. Якщо режим роботи ГТП знижувати шляхом зменшення витрат палива при збереженні витрат пари, то досягається покращення економічності ГТП (до 12% ) та збільшення мінімального коефіцієнту запаса міцності робочої лопатки турбіни (до 18% ).

**Ключові слова:** газотурбінний привід, впорскування води в камеру згорання, питомі витрати палива, витрата пари, закон регулювання, коефіцієнт запаса міцності.

## PROVIDING GAS - TURBINE ENGINE REQUIRED POWER AT THE HIGH TEMPERATURES OF THE ATMOSPHERE

*O. V. Kislov, N. I. Popovich*

The Laws of control of turboshaft engine with free turbine and combustion chamber steam injection are considered with a view to gas - turbine engine (GTE) fuel efficiency and lifetime. It is shown, that atmosphere temperature increase by steam flow consumption raising is able to provide with GTE power constancy and specific fuel consumption reduction. This approach disadvantage is reduction of turbine rotor blade minimum load factor. The new method providing GTE required power is offered. It consists in design of compressor turbine with reduced values of pressure decrease ratio. In such GTE at the design conditions for providing compressors and turbines power balances combustor steam supply is needed. At the design conditions with maximal values of rotor rotational speed and turbine inlet gas temperature with GTE has surplus power, therefore it must be operated at throttle conditions. If GTE mode is reduced by fuel consumption reduction while steam consumption is constant GTE efficiency improvement (up to 12% ) and increase of turbine rotor blade minimum load factor (up to 18% ) will be achieved.

**Key words:** gas- turbine engine, combustion chamber steam injection, specific fuel consumption, steam consumption, law of control, turbine rotor blade minimum load factor.

**Кіслов Олег Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теорії авіаційних двигателів Національного аерокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: OVKislov@mail.ru.

**Попович Наталія Івановна** – магістр кафедри теорії авіаційних двигателів Національного аерокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.