

УДК 629.735

О.В. КИСЛОВ

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

О НЕПОДОБИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРА ГТД ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ

Рассмотрены линии совместной работы компрессора и турбины газогенератора при разных температурах воздуха перед ним. Показана зависимость их положения от температуры воздуха перед газогенератором. Смещение линии совместной работы при неизменной площади критического сечения за газогенератором объяснено нарушением подобия режимов работы газогенератора. Показано, что неподобие режимов работы газогенератора при разных температурах воздуха перед ним вызвано изменением относительного расхода топлива. Выявлены другие причины смещения линии совместной работы при изменении температуры воздуха перед газогенератором. Сформулированы условия подобия режимов газогенератора. Полученные результаты могут быть использованы при пересчете результатов испытаний газогенераторов в атмосферных условиях на условия, соответствующие условиям работы газогенератора в составе ГТД.

Ключевые слова: газогенератор, подобие режимов работы, относительный расход топлива, приведенный расход топлива.

Введение

Испытания и доводка газогенераторов часто выполняется на специальных стендах при атмосферных температурах воздуха на входе, отличающихся от температуры воздуха перед газогенератором при его работе в составе ГТД [1]. Приведение результатов испытаний к рабочей температуре осуществляется с помощью теории подобия. В широко известных работах [1,2] сделан вывод, что независимо от температуры воздуха на входе в газогенератор при обеспечении условий $\pi_{\text{ГТД}}^* = \text{idem}$ и $n_{\text{пр}} = \text{idem}$ газогенератор работает на подобных режимах, поэтому положение рабочей точки на характеристике компрессора также не зависит от температуры воздуха на входе. Однако практика испытаний газогенераторов показывает, что это утверждение нарушается при существенном изменении температуры воздуха на входе. Например, для газогенераторов, использующихся в качестве турбокомпрессора высокого давления, температура на входе в него может достигать значений 450...550К, что приводит к отклонению линии совместной работы от ее положения, полученной при стандартной температуре атмосферы на высоте $H=0$.

Целью данной работы является выявление причин отсутствия подобия режимов работы газогенератора при разных температурах воздуха на входе в него. Оценка влияния выявленных факторов на положение ЛСР при разных температурах воздуха на входе в газогенератор.

1. Анализ уравнений, описывающих подобные режимы работы газогенератора

На подобных режимах все безразмерные параметры одинаковы. В работах [1, 2] для доказательства подобия режимов работы газогенератора принимается ряд допущений, затем анализируются уравнения, описывающие режимы работы газогенератора, и делаются выводы об условиях подобия режимов работы. Очевидно, что если нарушается подобие режимов работы при существенном изменении температуры воздуха на входе, значит, нарушаются принятые допущения. Для выявления причин неподобия необходим анализ справедливости допущений, уточнение их, учет измененных допущений при анализе уравнений, описывающих режимы работы газогенератора и корректировка выводов.

При анализе подобия режимов работы газогенератора используются условия совместной работы компрессора и турбины:

– баланс расходов

$$G_B(1 - g_{\text{охл}} - g_{\text{отб}})(1 + g_T) = G_T; \quad (1)$$

– баланс работ

$$L_T^*(1 - g_{\text{охл}} - g_{\text{отб}})(1 + g_T)\eta_{\text{мех}} = L_K^*, \quad (2)$$

а также уравнение для степени понижения давления в турбине, полученное из условия равенства расходов через турбину и сопло:

$$\pi_T^* = \left[\frac{\sigma_c F_{kp} q(\lambda_{kp})}{\sigma_{ca} F_{ca} q(\lambda_{ca})} \right]^{\frac{2n}{n+1}} \quad (3)$$

Приняв допущения об автомодельности течения по числу Рейнольдса, независимости от температуры газа показателя адиабаты k и пренебрежимо малом изменении относительного расхода топлива g_T , из уравнения (1) с помощью уравнения Христиановича получают уравнения лучей на характеристике компрессора при заданных отношениях температур $\frac{T_\Gamma^*}{T_B^*}$ (рис. 1)

$$\frac{\pi_k^*}{q(\lambda_B)} = \frac{m}{m_\Gamma} \frac{F_B}{F_{ca}} \frac{1}{\sigma_{kc} q(\lambda_{ca})} (1 + g_T) \times \times (1 - g_{охл} - g_{отб}) \sqrt{\frac{T_\Gamma^*}{T_B^*}} = \text{const} \sqrt{\frac{T_\Gamma^*}{T_B^*}} \quad (4)$$

и на каждом луче находится точка, удовлетворяющая уравнению (2). Геометрическое место полученных точек представляет собой линию совместной работы (ЛСР) компрессора и турбины.

Поскольку уравнение (2) может быть преобразовано к виду, независящему от температуры газа перед газогенератором T_B^*

$$\frac{k}{k-1} \cdot R \cdot \frac{\pi_k^* k - 1}{\eta_k^*} = \frac{k_\Gamma}{k_\Gamma - 1} \cdot R_\Gamma \cdot \left(\frac{T_\Gamma^*}{T_B^*} \right) \left(1 - \frac{1}{\pi_T^* \frac{k_\Gamma}{k_\Gamma - 1}} \right) \times \times \eta_T^* \eta_{мех} (1 - g_{охл} - g_{отб}) (1 + g_T), \quad (5)$$

то полученная таким образом ЛСР не зависит от T_B^* .

Однако при одинаковых отношениях температур $\frac{T_\Gamma^*}{T_B^*}$ и $\frac{T_K^*}{T_B^*}$ величина относительного расхода топлива g_T не остается неизменной при изменении T_B^* . Общепринято [1, 2], что

$$\frac{g_T}{T_B^*} = \text{idem} \quad (6)$$

Хотя и это выражение является приближенным. Более точное выражение может быть получено из баланса теплоты в камере сгорания с учетом изменения расхода газа в ней:

$$H_u g_T \eta_\Gamma = \left[(1 + g_T) i_\Gamma^* - i_k^* - g_T i_T^* \right] \quad (7)$$

Используя общепринятое допущение [3], что удельная энтальпия топлива примерно равна удельной энтальпии воздуха на входе в камеру сгорания, это уравнение приводится к виду

$$H_u \eta_\Gamma \frac{g_T}{1 + g_T} = i_\Gamma^* - i_k^* \quad (8)$$

Откуда

$$\frac{g_T}{1 + g_T} \frac{1}{T_B^*} = \frac{1}{H_u \eta_\Gamma} \left(\frac{k_\Gamma}{k_\Gamma - 1} \cdot R_\Gamma \frac{T_\Gamma^*}{T_B^*} - \frac{k}{k - 1} \cdot R \frac{T_K^*}{T_B^*} \right) \quad (9)$$

Поскольку $g_T \ll 1$, из формулы (9) и следует, что относительный расход топлива g_T меняется практически пропорционально T_B^* при неизменных отношениях температур $\frac{T_\Gamma^*}{T_B^*}$ и $\frac{T_K^*}{T_B^*}$.

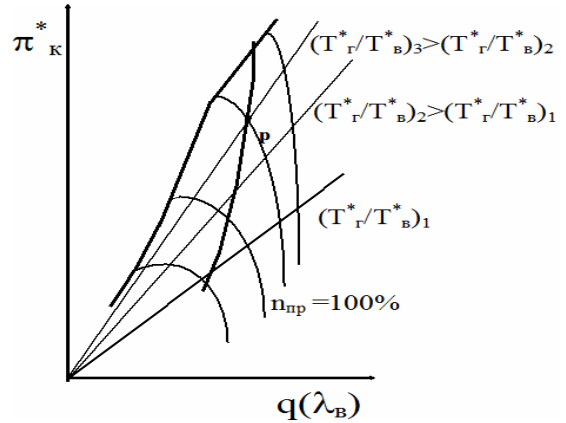


Рис. 1. ЛСР компрессора и турбины

Так как при испытаниях газогенератора на стенде температура воздуха перед газогенератором может быть примерно в два раза меньшей, чем при его работе в составе ГТД, величина g_T также уменьшается примерно в два раза. Это нарушает допущение, принятое при выводе уравнений (4) и (5). В частности, в уравнении (4) уменьшается величина const , что приводит к уменьшению угла наклона лучей при заданных отношениях температур $\frac{T_\Gamma^*}{T_B^*}$,

и уменьшается мощность турбины, что, в соответствии с уравнением (5), приводит к смещению рабочей точки по температурному лучу в сторону уменьшения π_k^* . В результате ЛСР удаляется от границы устойчивости компрессора.

Таким образом, при учете изменения относительного расхода топлива g_T ЛСР газогенератора при неизменной площади критического сечения сопла за ним теряет свойство универсальности и становится функцией от температуры воздуха перед газогенератором T_B^* . Как следствие, режим работы газогенератора однозначно задается не одним параметром $n_{пр}$, а двумя: $n_{пр}$ и T_B^* .

Кроме того, из рассмотренного анализа следует вывод о неподобии режимов газогенератора при

обеспечении подобия режимов работы компрессора. Действительно, для сохранения положения рабочей точки на характеристике компрессора при изменении температуры воздуха перед газогенератором T_B^* требуется изменение $\frac{T_{\Gamma}^*}{T_B^*}$ и π_T^* . Изменение $\frac{T_{\Gamma}^*}{T_B^*}$ следует из уравнения (4) и обеспечивает требуемый наклон температурного луча, а изменение π_T^* следует из уравнения (5) и обеспечивает неизменность положения рабочей точки на температурном луче.

Зависимость $\frac{T_{\Gamma}^*}{T_B^*}$ и π_T^* от температуры воздуха перед газогенератором T_B^* приводит к нарушению подобия режимов работы турбины и газогенератора в целом. Поэтому и приведенный расход топлива

$$G_{\text{тпр}} = G_{\text{т}} \frac{P_{\text{впр}}^*}{P_{\text{в}}^*} \sqrt{\frac{T_{\text{впр}}^*}{T_{\text{в}}^*}} = G_{\text{впр}} \frac{g_{\text{т}}}{T_{\text{в}}^*}$$

будет зависеть от T_B^* . Последнее утверждение математически следует из уравнения (9) и неодинаковости $\frac{T_{\Gamma}^*}{T_B^*}$ при разных T_B^* .

2. Анализ результатов расчета

Для оценки величины смещения ЛСР при изменении температуры воздуха перед газогенератором T_B^* были рассчитаны ЛСР газогенератора с $\pi_{\text{кр}}^* = 7$ при неизменной площади критического сечения сопла за ним при $T_B^* = 288\text{K}$ и $T_B^* = 528\text{K}$.

Математическая модель ТРД первого уровня реализована на принципах, описанных в [4].

Результаты расчета представлены на рис. 2.

Они подтверждают полученные выводы о зависимости положения ЛСР от температуры воздуха на входе в газогенератор и удалении ЛСР от границы устойчивости при уменьшении T_B^* . Кроме того, величина смещения ЛСР зависит от абсолютной величины относительного расхода топлива: чем больше величина $g_{\text{т}}$, тем сильнее расслоение ЛСР по T_B^* .

Заключение

В работе выполнен анализ влияния температуры воздуха перед газогенератором T_B^* на положение ЛСР газогенератора при заданной площади крити-

ческого сечения сопла. Показано, что при уменьшении T_B^* ЛСР удаляется от границы устойчивости компрессора. Величина смещения ЛСР зависит от величины изменения T_B^* . Режим работы газогенератора определяется двумя параметрами $n_{\text{пр}}$ и T_B^* . Причиной расслоения ЛСР является неодинаковость относительного расхода топлива $g_{\text{т}}$ при разных T_B^* .

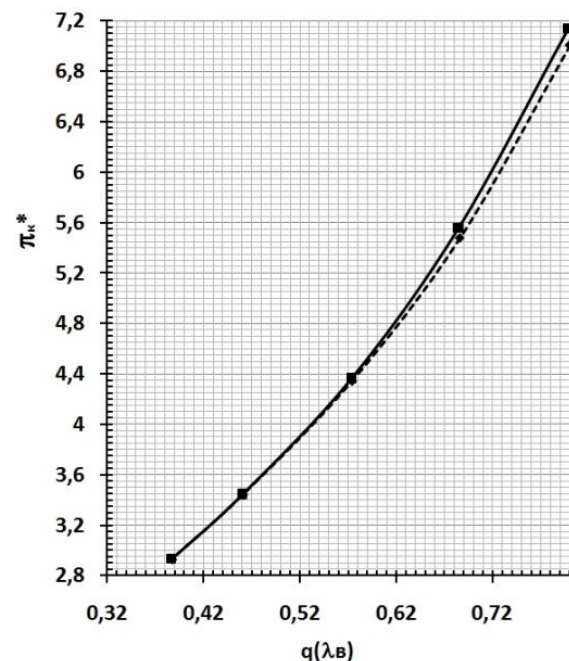


Рис. 2. ЛСР при разных T_B^* :

—◆— $T_B^* = 288\text{K}$; —■— $T_B^* = 528\text{K}$.

Кроме того, имеются и другие причины расслоения ЛСР при разных T_B^* : неодинаковость теплоемкостей воздуха и газа, неодинаковость геометрии проточной части газогенератора вследствие неодинаковости температурных расширений элементов конструкции.

В дальнейшем требуется сравнительная оценка влияния различных факторов на смещение ЛСР и разработка методики пересчета параметров газогенератора, полученных в условиях его испытания с низкими значениями T_B^* , на температуры воздуха, соответствующие условиям работы газогенератора в составе ГТД.

Литература

1. Нечаев Ю.Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Часть 2 / Ю.Н. Нечаев, Р.М. Федоров. – М.: Машиностроение, 1978. – 336 с.
2. Кулагин В.В. Теория газотурбинных двигателей: учебник в 2 кн. / В.В. Кулагин – М.: МАИ,

1994. – Кн. 2: Совместная работа узлов, характеристики и газодинамическая доводка выполненного ГТД. – 1994. – 304 с.

3. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей / В.М. Акимов, В.И. Бакулев, Р.И. Курзинер [и др.]; под ред. С. М. Шляхтенко. – 2-е изд. – М.:

Машиностроение, 1987. – 568 с.

4. Теория двухконтурных турбореактивных двигателей / В.П. Деменченко, Л.Н. Дружинин, А.Л. Пархомов [и др.]; под ред. С.М. Шляхтенко, В.А. Сосунова. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

Поступила в редакцию 26.05.2011

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

ПРО НЕПОДІБНІСТЬ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГАЗОГЕНЕРАТОРА ГТД ПРИ РІЗНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ

О.В. Кіслов

Розглянуті лінії спільної роботи компресора і турбіни газогенератора при різних температурах повітря перед ним. Показана залежність їх положення від температури повітря перед газогенератором. Зміщення лінії спільної роботи при незмінній площі критичного перерізу за газогенератором пояснено порушенням подібності режимів роботи газогенератора. Показано, що неподібність режимів роботи газогенератора при різних температурах повітря перед ним визвано зміненням відносних витрат палива. Виявлені інші причини зміщення лінії спільної роботи при змінній температурі повітря перед газогенератором. Сформульовані умови подібності режимів роботи газогенератора. Одержані результати можуть бути використані при перерахунку результатів випробувань газогенераторів в атмосферних умовах на умови, що відповідають умовам роботи газогенератора у складі ГТД.

Ключові слова: газогенератор, подібність режимів роботи, відносні витрати палива, приведені витрати палива.

ABOUT UNSIMILAR MODES OF GAS TURBINE ENGINE GAS GENERATOR AT DIFFERENT INLET AIR TEMPERATURE

O.V. Kislov

The operation lines of the gas generator compressor and turbine at different inlet air temperature are considered. The dependence of their positions from inlet air temperature are shown. The operation line displacement at a fixed area of the critical section behind of the gas generator is explained by similarity violation of the gas generator modes. It is shown that the non-similarity of gas generator modes at different inlet air temperatures is due to change relative fuel consumption. Other causes of the operation line displacement by varying the inlet air temperature are identified. Conditions of similarity gas generator modes are formulated. The results can be used in the recalculation results of gas generator tests from atmospheric conditions on the conditions, according gas generator modes in the engine.

Key words: gas generator, the similarity of operating modes, the relative fuel consumption, corrected fuel consumption.

Кіслов Олег Владимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теории авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: OBKislov@mail.ru.