

## К ВОПРОСУ О ПОЛНОМ ЗАМЕЩЕНИИ ВТОРИЧНОГО ВОЗДУХА ВОДЯНЫМ ПАРОМ В ПАРОГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКЕ С СИСТЕМОЙ ВВОДА И РЕГЕНЕРАЦИИ ВОДЫ(ПГТУ-СВРВ)

С.Д. Фролов, *д-р техн. наук, И.И. Петухов, канд. техн. наук, А.В. Минячихин, аспирант,*

*Национальный аэрокосмический университет "ХАИ" им. Н.Е. Жуковского, г. Харьков;*

*П.Д. Жеманюк, канд. техн. наук, А.И. Таран, зам. гл. конструктора, ОАО "Мотор Сич", г. Запорожье, Украина*

Под процедурой замещения вторичного воздуха водяным паром подразумевается не просто вытеснение его из камеры сгорания, а перевод в состав первичного воздуха для участия в реакции горения с дополнительным расходом топлива. Его предыдущая функция по снижению температуры продуктов реакции до заданной величины  $T_3^*$  цикла передаётся водяному пару. В свою очередь, водяной производится за счет утилизации части отводимой теплоты цикла в котле утилизаторе (КУ).

В итоге увеличивается не только количество подведенной к единице массы воздуха теплоты, но и термический КПД цикла вследствие регенерации части отведённой теплоты  $q_p$ . В то же время из-за увеличения массового расхода рабочего тела за счёт ввода пара и дополнительного расхода горючего становятся необходимыми конструктивные изменения элементов установки.

Поэтому необходим анализ рабочего процесса ПГТУ-СВРВ с целью выяснения всех "за" и "против" при реализации указанной процедуры. Прежде всего требуется получить ответы на такие вопросы:

1) возможно ли только за счёт утилизации теплоты выхлопной парогазовой смеси получить потребное количество и нужные параметры водяного пара, чтобы с его помощью и участием осуществить одновременно три функциональных элемента рабочего процесса установки: регенерацию теплоты выхлопного парогаса; эффективное замещение по хладоёмкости вторичного воздуха для обеспечения заданных параметров цикла  $\pi_k^*$  и  $T_3^*$ ; эффективное расширение па-

рогазовой смеси в блоке турбин без конденсации паровой фракции?

2) нужно ли и в какой мере возможно существующими или перспективными средствами из парогазовой смеси сконденсировать и вернуть в цикл столь большие расходы пара?

3) сохраняется ли актуальность использования концепции конвертирования исходных авиаприводов простого цикла (АП\_ПЦ) в ПГТУ-СВРВ при полном замещении вторичного воздуха паром?

4) насколько привлекателен прирост показателей энергетической эффективности установки, чтобы добиваться его реализации.

По ранее разработанным методикам и программам анализа энергетической эффективности рабочего процесса ПГТУ-СВРВ и её элементов [1] получены данные, позволяющие обосновать ответы на поставленные вопросы. Анализ проводился на базе исходного авиапривода простого цикла (АП-ПЦ) Д-336-2-10.

Для получения ответа на первый вопрос необходимо сначала определить потребный массовый расход энергетического пара  $G_{v2}$ , зависящий от ряда факторов, среди которых:  $T_{pr}$  - температура стехиометрической реакции горения, которая в свою очередь зависит от природы и состава топливных компонентов и условий проведения реакций;  $T_3$  - верхняя температура цикла; фазовое состояние и параметры пара на входе в камеру сгорания, зависящие от  $\pi_k$  - степени сжатия цикла и от количества утилизированной в КУ теплоты отработавшего парогаса.

В соответствии с уравнением теплового баланса для процесса в секторе смешения камеры сгорания, из которого получим:

$$G_{v2} = \frac{G_{m1}c_{pm1}(T_{pr} - T_3) - G_{a2}c_{pa2}(T_3 - T_{a2})}{\psi(1-x) + C_{pv2}(T_3 - T_{v2})}, \quad (1)$$

где:  $G_{m1}, c_{pm1}$  - массовый расход и удельная теплоёмкость стехиометрических продуктов сгорания;

$G_{a2}, c_{pa2}, T_{a2}$  - массовый расход, удельная теплоёмкость и температура остаточного вторичного воздуха;

$c_{pv2}, T_{v2}, x, \psi$  - удельная теплоёмкость, температура, степень сухости и скрытая теплота парообразования энергетического пара на входе в КС. Входящие в (1) величины определяются в ходе целостного расчёта рабочего процесса всей ПГТУ-СВРВ.

Возможность получения такого расхода энергетического пара зависит от величины утилизируемой в котле-утилизаторе теплоты отработавшего парагаза, т.е. определяется уравнением теплового баланса для рабочего процесса КУ, из которого получают требуемую величину температуры  $T_{m\Sigma}''$  охлаждённого в нём отработавшего в АП парагаза:

$$T_{m\Sigma}'' = T_{m\Sigma}' - \frac{G_{v2}}{G_{m\Sigma} * c_{pm\Sigma}} [c_1(T_{v2} - T_{10}) + \psi x], \quad (2)$$

где:  $G_{m\Sigma}, c_{pm\Sigma}, T_{m\Sigma}'$  - массовый расход, удельная теплоёмкость и температура на входе в КУ отработавшего в АП парагаза;  $c_1, T_{10}$  - удельная теплоёмкость и температура поступающей в КУ воды.

Поскольку отработавший в АП парагаз поступает в КУ в существенно перегретом по пару состоянии, а вводимая в него вода предварительно нагрета в вихревом конденсаторе-сепараторе (ВКС) [2], то величина  $T_{m\Sigma}''$ , обычно выше “точки росы” парового компонента. Следовательно, для получения нужного количества энергетического пара  $G_{v2}$  достаточно только теплоты конвективного охлаждения парагаза.

При степени сухости энергетического пара 0.75 потребный для полного замещения вторичного воздуха массовый расход энергетического пара  $G_{v2}$  и тем-

пература  $T_{m\Sigma}''$  отработавшего в АП парагаза на выходе из КУ зависят от вида топлива. Для керосина

$$G_{v2} = 18.623 \text{ кг/с}; T_{m\Sigma}'' = 399.0 \text{ К};$$

для метана

$$G_{v2} = 18.847 \text{ кг/с}; T_{m\Sigma}'' = 391.0 \text{ К}.$$

Полученные значения  $T_{m\Sigma}''$  выше температуры “точки росы”, которая в рассматриваемом варианте составляет величину  $T_s = 353 \text{ К}$ .

Ответ на второй вопрос, по существу, рассмотрен в [2] и сводится к безусловной необходимости регенерации воды. Приведённые результаты по сопоставлению существующих и перспективных способов и средств осуществления замыкания рабочего цикла по воде подтверждают наличие возможности положительного решения этой задачи.

В частности, вполне продуктивными для этих целей представляются струйные и вихревые аппараты контактного типа, разработка которых уже осуществляется в ходе решения проблемы конвертирования газотурбинных приводов простого цикла в АП-СЦ [3].

Относительно вопроса об использовании концепции метода конвертирования ГТП-ПЦ в ГТП-СЦ в случае полного замещения вторичного воздуха паром можно отметить следующее:

- метод уже применяется при разработке ПГТУ-СВРВ типа STIG с весьма ограниченным вводом (до 20% от расхода циклового воздуха) пара, получаемого в котле-утилизаторе за счёт теплоты выхлопного газа;
- установка усложняется вследствие элементов обслуживающей системы (СВРВ), но в самом исходном ГТП-ПЦ существенные конструктивные изменения производятся только в силовой турбине;
- в варианте с полным замещением вторичного воздуха паром потребуются конструктивные изменения и в камере сгорания (главным образом в зоне смешения стехиометрических продуктов и энергетического пара) из-за значительного увеличения расхода. Параметры собственно рабочего процесса в камере сгорания остаются неизменными;

- возможен вариант без переделки основных элементов исходного АП путём перевода всего “лишнего” рабочего тела в отдельную камеру сгорания и далее в дополнительную турбину.

Сопоставительный анализ показателей энергетической эффективности конвертируемого исходного АП-ПЦ Д-336-2-10 в АП-СЦ различных типов представлен в таблице. Здесь ПГТУ-СВРВ – с системой ввода и регенерации воды; ГТУ-СРПВ – с системой регенеративного подогрева воздуха; ПГТУ-СРБЦ – с системой реализации бинарного цикла; ГТУ-СТКУ – с

системой турбокомпрессорного утилизатора:  $l_{уд}$  - удельная мощность (относительно расхода циклового воздуха);  $\eta_e$  - эффективный КПД;  $c_{уд}$  - удельный расход воды (пара) относительно расхода циклового воздуха;  $\gamma$  - степень замещения вторичного воздуха;  $\sigma_p^*$  - степень регенерации теплоты.

Полученные данные безусловно, подтверждают выводы относительно целесообразности реализации замещения вторичного воздуха паром.

Таблица 1

Двигатель			$l_{уд} \frac{\text{кВт}}{\text{кг}_{\text{вх.в}}}$	$\eta_e \%$	$c_{уд} \frac{\text{кг}_{\text{топ}} \text{час}}{\text{кВт}}$	$g_{\Sigma \text{вод}} \frac{\text{кг}_{\text{вод}}}{\text{кг}_{\text{вх.в}}}$
Д-336-2-10			241,0	34,8	0,216	0
ПГТУ-СВРВ	$\gamma$	0,1	416,3	39,7	0,1855	1,9182
		0,2	485,1	46,3	0,1592	2,7623
ГТУ-СРПВ с конв, пром, охлаждением	$\sigma_p^*$	0,97	335	40,4	0,1824	0
		0,95	320,7	39,8	0,1852	0
ГТУ-СРПВ с исп, пром, охлаждением	$\sigma_p^*$	0,97	358,5	41,8	0,1763	0,0557
		0,95	350,2	41,2	0,1789	0,0557
ПГТУ-СРБЦ			270,8	39,1	0,1883	0,0868
ГТУ-СТКУ			256,3	37,0	0,199	0

### Литература

1. Разработка математических моделей и программ расчета систем ввода и регенерации воды (СВРВ) и регенеративного подогрева циклового воздуха (СРПВ): Отчёт о НИР / Государственный аэрокосмический университет “ХАИ”.- Г205-6/97. ГР № 0198U001594.- Харьков, 1998.- 106 с.

2. Система ввода и регенерации воды (СВРВ) авиапривода сложного цикла на основе струйных и вихревых аппаратов / С.Д. Фролов, И.И. Петухов, Ю.В. Шахов, А.В. Минячихин // Авиакосмическая техника и технология: Сб. науч. тр.- Харьков: ХАИ, 2002.- Вып. 30. Двигатели и энергоустановки.- С. 50—58.

3. Принципы конвертирования газотурбинных двигателей авиационного и судового типов / А. Коваленко, О. Муравченко, Ю. Бухолдин, В. Парафейник, С. Елифанов, С. Фролов // Газотурбинные технологии.- 2002.- № 5 (20) С. 20—24.

*Поступила в редакцию 04.06.03*

**Рецензенты:** д-р техн. наук, профессор, нач. отдела А.Л. Шубенко, ИПМаш НАНУ, г. Харьков; канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования АД С.И. Суховей, Национальный аэрокосмический университет “ХАИ” им. Н.Е. Жуковского, г. Харьков.