

УДК 621.438

## ОБЛАСТЬ ДОСТИЖИМЫХ ПАРАМЕТРОВ И КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИХРЕВОГО КОНДЕНСАТОРА-СЕПАРАТОРА (ВКС)

Фролов С.Д., Синявин А.В., Сманцер В.В.

ВКС в составе парогазотурбинной установки с системой ввода и регенерацией воды ( ПГТУ-СВРВ ) используется для извлечения влаги, содержащейся в парогазовом потоке, удельный массовый расход которой ( на 1 кг воздуха ) равен

$$d_{v_{\Sigma}} = d_{v_1} + d_{v_2} + d_{v_T} \quad (1)$$

где  $d_{v_1}$  - пар, введенный с помощью вихревого испарительного кондиционера (ВИК) для промежуточного охлаждения компрессорного воздуха;  $d_{v_2}$  - пар из котла-утилизатора ( К-У ), введенный за счет утилизации части отведенной в цикле теплоты;  $d_{v_T}$  - водяной пар, образованный в камере сгорания ( КС ) при сжигании водорода, входящего в состав топлива.

Величина  $d_{v_T}$  третьего источника зависит от состава топливных компонентов и величины коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ . Если химическую формулу молекулы воздуха представить в виде  $N_{1.536} O_{0.464}$  и записать уравнение для стехиометрической реакции окисления керосина  $CH_2$  в атмосфере воздуха, то можно определить количество образовавшейся в ходе реакции воды. Так, в расчете на 1 кг воздуха, находящегося в стехиометрической зоне КС, образуется 0.0962 кг водяного пара, т.е.  $d_{v_T} = 0.0962$ . Или, с учетом избытка воздуха в КС, пересчитаем количество, образовавшейся в ходе реакции воды, на 1 кг воздуха, поступающего на

вход в двигатель;

$$d_{v_T} = \frac{d_{v_T}}{\alpha} \quad (2)$$

Целью рабочего процесса ВКС [ 1 ] является возможно полная конденсация пара из отработавшего в К-У парогаса, возможно полный сбор конденсата и его возврат вместе с охлаждающей водой в водяной циркуляционный контур СВРВ. При этом ВКС должен удовлетворять ряду требований:

- обеспечивать максимально возможную степень регенерации введенной в цикле ПГТУ-СВРВ воды;
- использовать минимальное количество охлаждающей жидкости;
- иметь малое гидравлическое сопротивление в газовом тракте;
- иметь небольшие габариты.

Для оптимизации рабочего процесса ВКС, исходя из этих требований, определим критерии эффективности.

К числу таких критериев прежде всего следует отнести величину  $d_l$  - потребный удельный (на 1 кг воздуха) расход охлаждающей жидкости в ВКС. Это важный показатель, характеризующий не только совершенство непосредственно процесса конденсации пара, но и потребную мощность для создания циркуляции и диспергирования охлаждающей жидкости, массо-габаритные показатели распыливающего устройства и др. Величина  $d_l$  зависит от состава ( $d_{v\Sigma}$ ) и параметров парагаза на входе в ВКС ( $P_5, T_{m5}$ ), а также от температуры, до которой осуществляется нагрев охлаждающей жидкости ( $T_{\ell_5}$ ). Охлаждающая жидкость вводится в ВКС на внутреннем радиусе камеры  $R_5$ , при помощи распыливающего устройства с удельным расходом  $d_l$ . Таким образом на периферийный радиус камеры  $R_5$ , к месту сепарации приходит жидкость нагретая до температуры  $T_{\ell_5}$  с удельным массовым расходом

$$d_{\ell\Sigma} = d_l + d_{v\Sigma} - d_n, \quad (3)$$

где  $d_n = \xi_\phi \cdot d_l + \xi_c \cdot d_{\ell\Sigma} + d_{nv}$  - суммарные потери жидкости обусловленные:

- уносом выхлопными газами мелких (нерасчетных) капель охлаждающей жидкости из-за несовершенства устройства ввода жидкости.  $\xi_\phi$  - коэффициент потерь при распыливании жидкости форсунками;
- уносом мелких капель в составе выхлопных газов из-за некорректной сепарации капель и их вторичного дробления на периферийном радиусе, а также из настенных жидких пленок.  $\xi_c$  - коэффициент потерь при сепарации;

• уносом в виде пара. Этот вид потерь обусловлен "точкой росы" в парогазе. Например, если на выходе параметры парогаса  $P_5 \approx 1$  бар,  $T_{m5} \approx 30^\circ\text{C}$ , то  $d_{пв} = 0.0281$ .

Чтобы снизить до требуемого уровня потери воды в виде пара, нужно обеспечить соответствующее снижение температуры ("точки росы") парогаса. Для этого потребен достаточно большой расход охлаждающей жидкости  $d_c$ .

Потери, связанные с сепарацией, можно полностью устранить или значительно уменьшить, обеспечив для этого необходимые условия на периферийном радиусе камеры  $R_5$ . Поэтому в дальнейшем потерями при сепарации будем пренебрегать ( $\xi_c = 0$ ).

Более важной и труднее решаемой задачей является снижение потерь, связанных с несовершенством распыла. Для ее решения необходимо обеспечить монодисперсный распыл охлаждающей жидкости или хотя бы свести к достаточному минимуму массовую долю фракций мелких капель в спектре распыла форсунок.

Для определения эффективности регенерации воды с помощью ВКС в составе ПГТУ-СВРВ предлагается использовать следующий критерий:

$$E_p = \frac{d_{v\Sigma} - d_{п}}{d_{v1} + d_{v2}} \quad (4)$$

-коэффициент регенерации, равный отношению количества пара, уловленного в ВКС, к количеству пара, введенного в цикл ПГТУ.

Важной энергозатратой, связанной с функционированием ВКС, является гидросопротивление парогазового тракта ВКС, на преодоление которого затрачивается часть располагаемой мощности силовой турбины. Для оценки потерь располагаемой мощности энергоустановки целесообразно использовать следующий коэффициент

$$\xi_{\Delta N}^{\text{ВКС}} = \frac{\Delta N_{\text{уд}}^{\text{ВКС}}}{N_{\text{уд}}}, \quad (5)$$

где  $N_{\text{уд}}$ -располагаемая удельная (на 1кг воздуха) мощность энергоустановки;  $\Delta N_{\text{уд}}^{\text{ВКС}}$  - потеря располагаемой удельной мощности из-за гидросопротивления в парогазовом тракте ВКС.

Основным размером ВКС, характеризующим его габариты, является разность величины периферийного и внутреннего радиуса камеры ВКС  $\Delta R = R_5 - R_5'$ .

Для оценки габаритов ВКС будем использовать следующий коэффициент:

$$K_{\Delta R} = \frac{\Delta R}{R_5} \quad (6)$$

На рис. 1 и 2 приведены номограммы для определения описанных выше критериев  $E_p, \xi_{\Delta R}^{ВКС}, d_c, K_{\Delta R}$  в области реализуемых параметров ( $t_p, g_{ку}$  - температура и массовая доля пара, подаваемого в КС) для ПГТУ-СВРВ на базе авиационного двигателя АИ-9-3Б [2]. Расчеты выполнялись с ожидаемыми потерями жидкости при распыливании  $\xi_{\phi} = 0.01$  и при следующих значениях начальных параметров в ВКС, удовлетворяющих различного вида ограничениям:

- $T_{t_5} = T_s(P_s, d_{v\Sigma}) - \Delta T_s$  - температура, до которой осуществляется нагрев охлаждающей жидкости. Принята с гарантированным запасом  $\Delta T_s = 10^\circ$  от условия начала испарения капли. При уменьшении  $\Delta T_s$  уменьшаются  $d_c$  и  $K_{\Delta R}$ ;

- $\delta_{t_5} = 300 \text{ мкм}$  - начальный радиус капли охлаждающей воды. При малых значениях  $\delta_{t_5}$  гидросопротивление ВКС уменьшается, но при этом усложняется конструкция распыливающего устройства;

- $W_{t_5} = 9 \text{ м/с}, W_{r_5} = 1.8 \text{ м/с}$  - радиальные компоненты скоростей парагаза и жидкости на периферийном радиусе камеры  $R_5$ . Такое соотношение этих параметров удовлетворяет условию оптимальной сепарации жидкости (угол подлета капли к поверхности сепарации  $10-15^\circ$ ). Малые значения этих скоростей приводят к невысокой скорости жидкости во всей камере ВКС, что осложняет процесс распыливания жидкости и приводит к необходимости учета силы тяжести, действующей на каплю. Гидросопротивление ВКС при этом минимальное;

- $R_5 = 120 \text{ мм}$  - внутренний радиус камеры.  $R_5$  не может быть слишком малым, т.к. на этом радиусе необходимо разместить распыливающее устройство и обеспечить невысокие скорости выходящего парагаза.

Анализ номограмм позволяет сделать следующие выводы:

- точка С, обозначенная на рис. 1 и 2, является точкой наибольшего нагружения ВКС ( $d_c$  - максимальное) и наименьшего нагружения К-У ( $t_p, g_{ку}$  - минимальные). Это связано с тем, что для получения в К-У пара с параметрами  $t_p = 159^\circ\text{C}$  и  $g_{ку} = 0.15$ , необходимо минимально использовать теплоту выхлопных газов, а значит на входе в ВКС будет максимальная температура парагаза  $T_{t_5}$ .

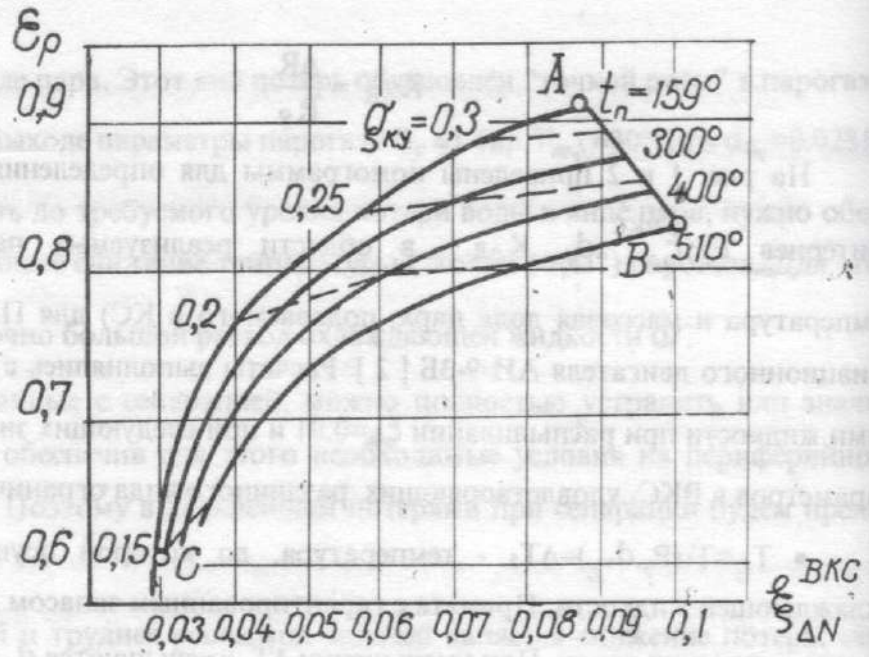


Рис. 1.

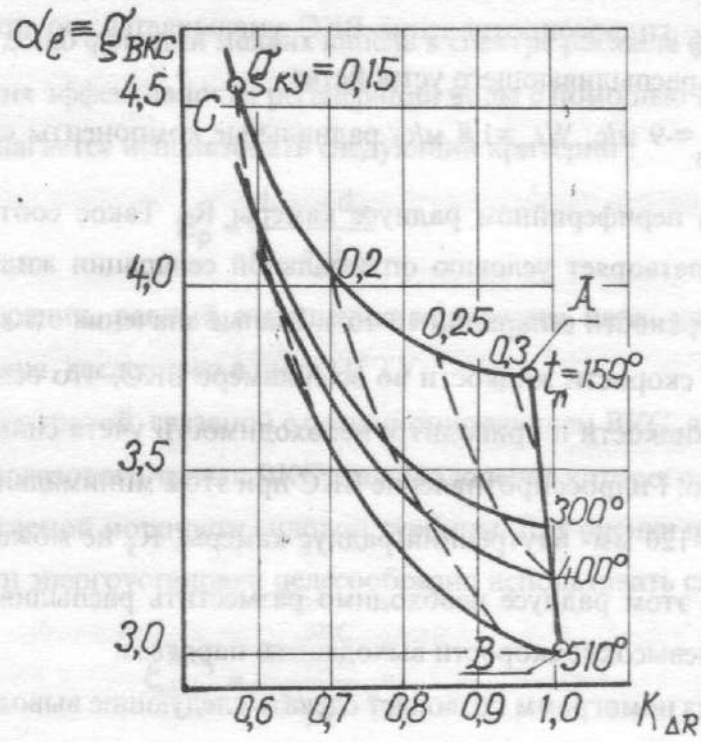


Рис. 2.

Точку С нельзя считать оптимальной для работы ВКС, т.к. здесь хотя и минимальная потеря располагаемой мощности  $\xi_{\Delta N}^{ВКС}$ , но степень регенерации  $E_p$  низкая, а потребное количество жидкости  $d_c$  высокое;

- точка Б - точка наибольшего нагружения К-У и наименьшего нагружения ВКС ( $d_c$  - минимальное). Точка Б не может быть выбрана в качестве рабочей точки для ВКС, т.к.  $\xi_{\Delta N}^{ВКС}$  и габаритный показатель  $K_{\Delta R}$  являются максимальными;

- оптимальной точкой для работы ВКС можно считать точку А, в которой степень регенерации максимальная ( $E_p=0.91$ ), а  $\xi_{\Delta N}^{ВКС}$  и  $d_c$  имеют средние значения. Максимум  $E_p$  в этой точке объясняется тем, что при большем замещении вторичного воздуха в КС (увеличение  $g_{ку}$ ) уменьшается  $\alpha$  в КС., а значит по (1) возрастает величина  $d_{v,T}$ , которая в точке А максимальная.

Как было отмечено выше, расчеты выполнялись при начальных данных в ВКС, которые удовлетворяют описанным выше ограничениям во всей рассматриваемой области изменения  $t_n, g_{ку}$ , но в каждой конкретной рабочей точке запасы по ограничениям за счет изменения внутренних параметров ВКС ( $\Delta T_5, \delta_{t_5}, W_{mT_5}, W_{t_5}$ ) можно уменьшить так, чтобы показатели эффективности ВКС несколько улучшились.

Список использованных источников:

1. Фролов С.Д., Сманцер В.В., Синявин А.В. и др. Регенерация воды в цикле контактной газопаровой установки (КГПУ) // Труды ХАИ "Авиационно-космическая техника и технология" - Харьков, 1996. - с.131-135.
2. Фролов С.Д., Костенко П.П., Степанов И.Ю., Папуга А.И. Анализ цикла парогазотурбинной установки с системой ввода и регенерации воды (ПГТУ-СВРВ) на базе ГТУ АИ-9-ЗБ. ( см. статью в данном сборнике)