

## ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ БЛОКА ДОЖИГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ НК-37

© 2007 А. М. Постников, Ю. И. Цыбизов, В. М. Белкин, В. И. Васильев, В. П. Чикин

ОАО «СНТК им. Н. Д. Кузнецова», г. Самара

В работе показана высокая эффективность применения принципов организации рабочего процесса форсажных камер авиационных двигателей при конструировании камер дожигания (КД) парогазовых установок. Приведены основные технические решения таких камер дожигания и подходы к разработке алгоритма автоматизированной системы управления подачей топлива в КД.

В настоящее время широкое применение в промышленности и энергетике находят авиапроизводные двигатели. Они имеют высокий КПД термодинамического цикла и, как следствие, относительно низкую температуру выхлопных газов, что ограничивает их использование для выработки перегретого пара с нужными для парогазовых установок (ПГУ) энергетическими показателями. Для такого двигателя экономически обоснованным является внедрение блока дожигающих устройств в выхлопной системе (шахте) перед котлом-утилизатором (КУ).

В ОАО «СНТК им. Н.Д.Кузнецова» разработан блок дожигающих устройств (БДУ) для двигателя НК-37 ( $N = 25$  МВт, КПД = 36,4 %) применительно к ПГУ Лидской ТЭЦ (республика Беларусь). Суммарная мощность установки может быть повышена до 63 МВт, а КПД до 45% при применении паровой турбины с КПД, равным примерно 35...36%.

К БДУ предъявляются жесткие требования:

- по температурному полю перед котлом-утилизатором ( $\pm 20^\circ\text{C}$  от среднего значения);
- экологическим характеристикам (допустимое повышение концентрации оксидов азота  $NO_x$  не более  $10 \text{ мг/м}^3$  и монооксида углерода  $CO$  не более чем на  $50 \text{ мг/м}^3$ );
- функциональной и прочностной надежности (камера дожигания БДУ должна обеспечить постоянную среднюю температуру газов перед котлом  $T_{\text{кд}}^{\text{ном}} = \text{const}$  независимо от режима работы ( $0,3N_{\text{ном}} \dots 1,0N_{\text{ном}}$ ) и ус-

ловий эксплуатации (от минус  $50^\circ\text{C}$  до плюс  $45^\circ\text{C}$ )).

В табл. 1 представлены результаты термодинамического расчета камеры дожигания (КД). Видно, что в реальном диапазоне изменения температуры на входе в двигатель от  $-30^\circ\text{C}$  до  $+30^\circ\text{C}$  и мощности (50...100) % расход топлива изменяется почти в 3 раза, а требуемый подогрев  $DT_{\text{кд}} = (80 \dots 210)^\circ\text{C}$ . Схема ПГУ предусматривает расположение КД в шахте с площадью поперечного сечения около  $20 \text{ м}^2$ . Широкий диапазон изменения параметров камеры и большая площадь поперечного сечения обостряют проблемы, возникающие при выполнении требований ТЗ.

Необходимы нестандартные подходы к выбору конструктивной схемы камеры дожигания и автоматизированной системы подачи и управления топливом БДУ.

Для решения поставленных задач в БДУ реализованы принципы организации рабочего процесса, разработанные для форсажных камер ФК двигателей семейства «НК».

Известно, что при горении бедной топливоздушной смеси скорость распространения пламени мала. В потоке газов, забалластированных продуктами сгорания двигателя, дополнительно снижаются полнота сгорания и устойчивость к срыву пламени. Аналогичные проблемы в ФК усугублялись высокой скоростью набегающего потока, поэтому заимствованные для КД принципы и технические решения можно считать проверенными в более жестких условиях. Это:

- применение комбинированного стабилизатора пламени (далее просто стабилиза-

Таблица 1

Температура окружающей среды	°С	-30	-30	+30	+30
Мощность на клеммах генератора	%	50	100	50	100
Температура за СТ	°С	308	357	434	471
Температура за СТ	К	581	630	707	744
Расход газа за СТ	кг/с	82,75	113,34	71,41	90,25
Давление газа за СТ	кг/см <sup>2</sup>	1,069	1,149	1,064	1,108
Коэффициент избытка воздуха за СТ	-	5,647	4,572	4,576	3,961
Скорость газа на входе в КД	м/с	6,65	9,2	7,02	9,17
Расход газа в КД	кг/час	1600	1880	630	475
Расход газа в КД	кг/с	0,444	0,522	0,175	0,127
Температура газа перед котлом-утилизатором	°С	520	520	520	520

тора), состоящего из продольного (базового) уголка и расположенных на его кромках поперечных уголков. Зоны стабилизации за продольными и поперечными уголками газодинамически связаны;

- наличие форкамеры, обеспечивающей дежурную зону горения. Для КД - это центральный стабилизатор с воспламенителем топлива;

- эшелонирование остальных стабилизаторов по потоку. Величина сдвига стабилизаторов определяется размером зоны обратных токов за поперечными уголками;

- длина камеры дожига (расстояние от фронтального устройства до котла-утилизатора) должна быть  $L \geq 15H$ , где  $H$  - расстояние между уголками в решетке стабилизаторов.

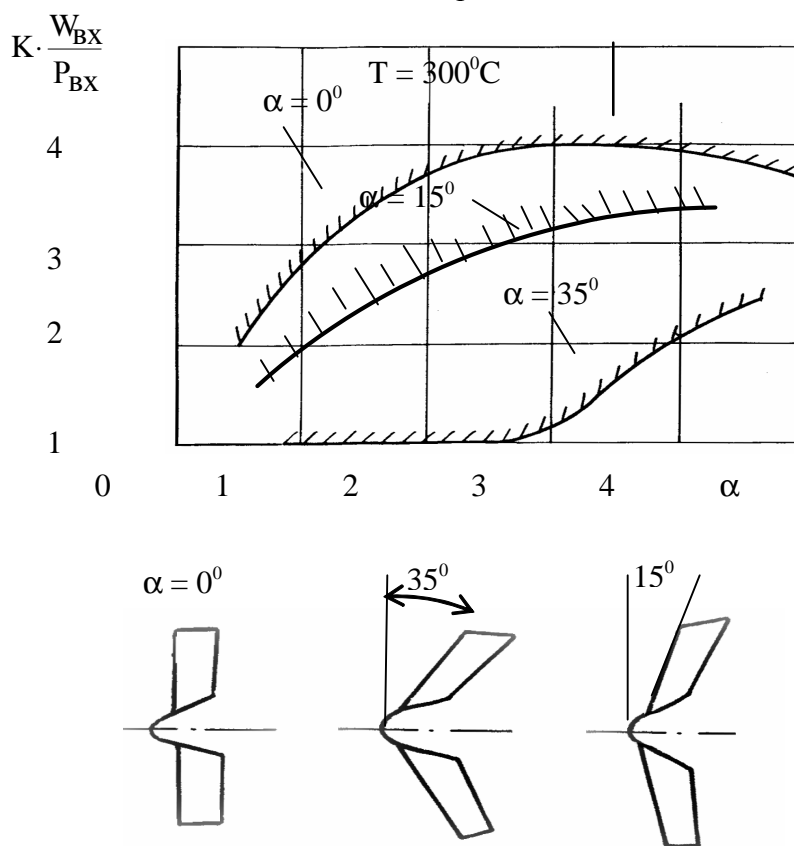


Рис. 1. Влияние на устойчивость горения угла наклона поперечных стабилизаторов пламени:

$W_{вх}$  - скорость потока;  $P_{вх}$  - давление на входе;  
 $K$  - коэффициент, приводящий комплекс к безразмерному виду

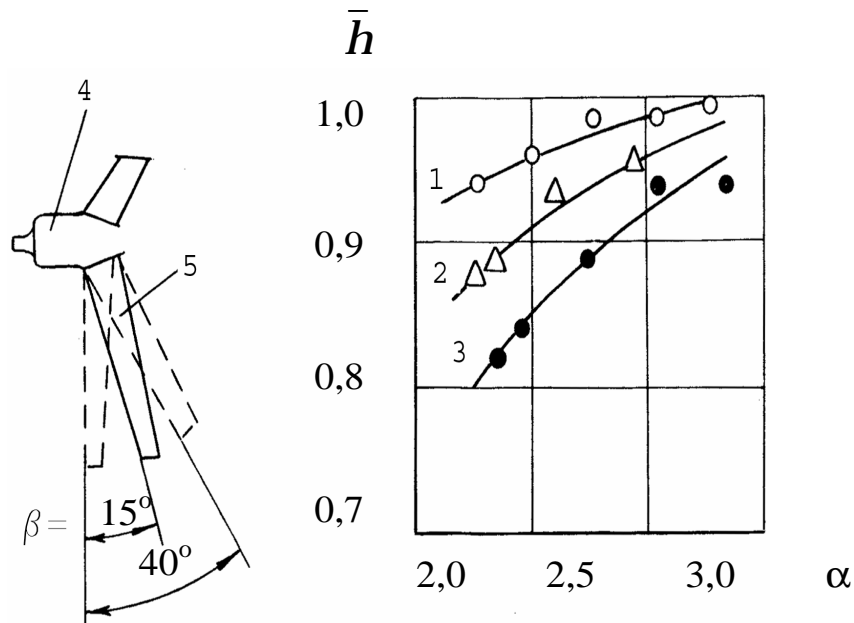


Рис. 2. Влияние угла наклона поперечного стабилизатора на полноту сгорания топлива системы стабилизаторов пламени:

$$\bar{h} = \frac{h_i}{h_{max}}; P^* = 100 \text{ кПа}; T^* = 473 \text{ К}; I = 0,31; \bar{f} = 35\%$$

$$1 - b = 15^\circ; 2 - b = 0^\circ; 3 - b = 40^\circ;$$

4 – базовый продольный стабилизатор; 5 – поперечный стабилизатор;

$I$  – приведенная скорость потока;  $f$  – степень загромождения

На рис. 1, 2, 3 приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных на модели форсажной камеры, которые послужили основанием выбранных для КД основных технических решений.

Из графиков следует, что:

- для получения высокой полноты сгорания и устойчивой работы в сложных системах стабилизации пламени, когда зоны циркуляций за уголками оказываются связанными, оптимальным является угол наклона поперечного уголка в  $(15...25)^\circ$  от вертикали, при этом обеспечивается необходимая «огневая поддержка» от базового уголка и еще сохраняется достаточное стабилизирующее свойство системы;

- для расширения диапазона устойчивой работы стабилизаторов в продольных (базовых) уголках необходимо установить так называемые «карбюраторы» – устройства, назначение которых – подача топлива под углом в нужные места зон циркуляции потока.

Конструктивная схема камеры дожигания (КД) БДУ для Лидской ТЭЦ представлена на рисунке 4. КД конструктивно представ-

ляет собой газоход прямоугольного сечения. На фланцах каждой из боковых панелей газохода закреплено 11 фронтальных устройств (ФУ) 1, образующих три топливных контура. На фланцах центральных ФУ с каждой стороны установлено по одному воспламенителю. ФУ представляет собой сварной узел, состоящий из топливного коллектора со стойками 2 и стабилизаторов пламени 3. В ФУ устанавливается раздаточная труба 4 для равномерной раздачи топлива по длине коллектора. Для переброса пламени между соседними ФУ установлены крышки.

Для контроля воспламенения топлива на боковых панелях установлены датчики контроля воспламенения (2 фотодатчика и 4 термопары).

В процессе эксплуатации и при проведении регламентных работ конструкция КД предусматривает демонтаж топливных коллекторов и раздаточных труб для ремонта и прочистки отверстий при наличии закоксованности, причем коллекторы демонтируются внутри газохода, раздаточные трубы – снаружи. Предусмотрен также демонтаж воспла-

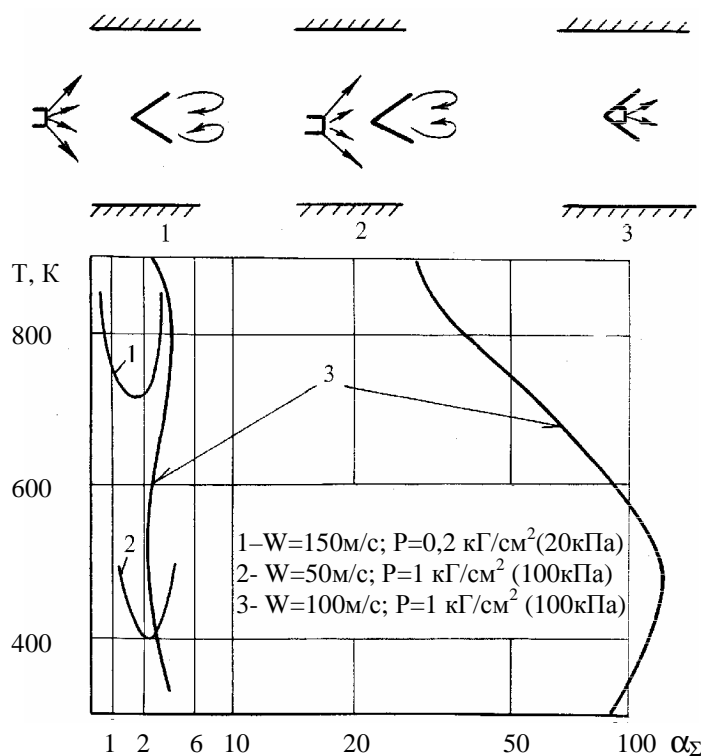


Рис. 3. Влияние параметров потока  $W, T, P$  и распределения топлива на границы срыва пламени: 1, 2 – подача топлива на уголок: 1 – центробежная форсунка, 2 – струйная форсунка; 3 – карбюратор (подача топлива под уголок);  $D$  – ширина уголка

менителей со свечами, фотодатчиков, термопар снаружи газохода КД.

Топливная система КД состоит из трех контуров. Первый (дежурный) контур обслуживает центральный стабилизатор (около 14% суммарного расхода топлива  $G_m$ ). Второй и третий контуры являются основными.

Кроме требований по температурному полю и поддержания средней температуры  $T_{кд} = const$  независимо от внешних условий и режима работы двигателя разработки КУ оговаривают еще две позиции:

- при запуске и выходе на режим максимальная температура перед КУ не должна превышать более чем на  $100^\circ\text{C}$  минимальную температуру;

- при работе на установившемся режиме местная температура газа не должна превышать  $T_{max}$ .

Для реализации всех этих требований предусмотрена автоматизированная система управления топливом КД (АСУ КД).

АСУ КД включает:

- 3 независимых дозатора топлива;

- систему измерения температуры газов перед КД;

- систему измерения температуры газов перед КУ, основным элементом которой является гребенка термопар, спаи которой сгруппированы таким образом, что обеспечивают измерение температуры газов за стабилизатором каждого контура отдельно;

- контроллер, управляющий дозаторами топлива.

Разработан алгоритм управления АСУ КД.

1. По команде «ЗАПУСК»:

- включается питание на электросвечи воспламенителя, куда одновременно подается топливо;

- через 5 секунд подается топливо  $G_m^{min}$  в 1 контур, через 10 секунд выключаются воспламенители;

- если все датчики наличия пламени (термопары и фотодатчики) фиксируют наличие пламени, то «ЗАПУСК» завершен.

2. Плавно увеличивается ( $\uparrow$ ) расход топлива в 1 контур, пока температура в следе за

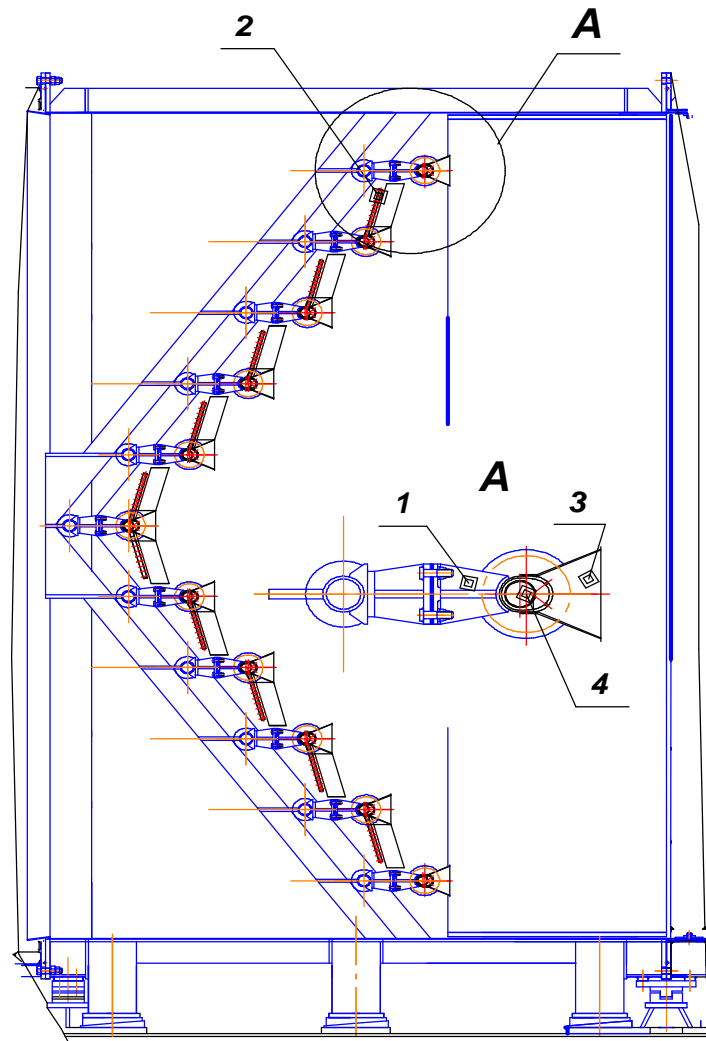


Рис. 4. Конструктивная схема камеры дожигания:

1 – фронтное устройство; 2 – топливные стойки; 3 – стабилизатор пламени; 4 – раздаточная труба

стабилизатором 1-го контура  $T_{1к}$  не достигнет ( $\rightarrow$ ) значения  $T_{1к} = T_{\text{окд}} + 100^\circ$  ( $T_{\text{окд}}$  – температура газов до КД), но не должен превышать  $T_{\text{max}}$ .

3. Далее включается топливо 2-го контура, расход которого увеличивается до тех пор пока:

- либо  $T_{2к} \rightarrow (T_{\text{окд}} + 100) \leq T_{\text{max}}$ ;
- либо  $T_{\text{кд}} \rightarrow T_{\text{кд}}^{\text{ном}}$ , при этом  $T_{1к} = \text{const}$ ;

4. Если  $T_{\text{кд}} < T_{\text{кд}}^{\text{ном}}$ , то включается 3-ий контур  $G_{3к}$  - пока:

- либо  $T_{3к} \rightarrow (T_{\text{окд}} + 100) \leq T_{\text{кд}}^{\text{max}}$ ;
- либо  $T_{\text{кд}} \rightarrow T_{\text{кд}}^{\text{ном}}$ , при этом  $T_{1к} = T_{2к} = \text{const}$ ;

5. Если после этих операций  $T_{\text{кд}} < T_{\text{кд}}^{\text{ном}}$ , то цикл повторяется, начиная с п. 2.

На рис. 5 приведен пример циклограммы выхода БДУ на режим КУ при  $t_1^* = -30^\circ\text{C}$  и  $N = 100\% N_{\text{ном}}$  двигателя НК-37 для ГТУ Лидской ТЭЦ.

Результаты численного моделирования рабочего процесса показали, что разработанный блок дожигающих устройств обеспечивает выполнение требований технического задания по температурному полю, гидравлическим потерям, полноте сгорания топлива и экологическим характеристикам.

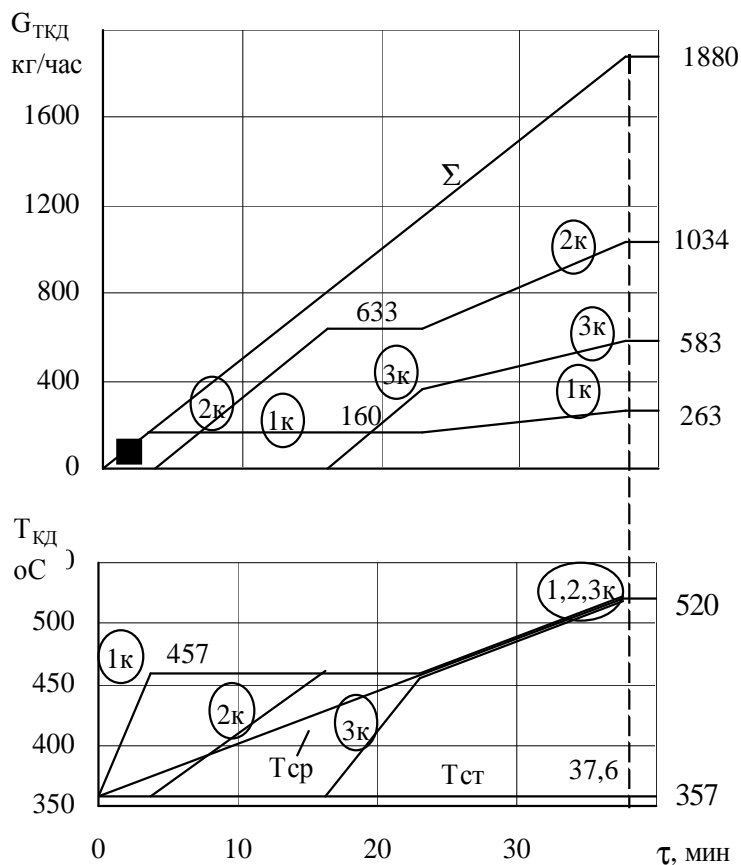


Рис.5. Циклограмма выхода на режим

$$t_1^* = -30^\circ \text{C}, N = 25,5 \text{ Мвт}, \blacksquare - G_{\text{КД}}^{\text{мин}}.$$

Цифры у кривых – соответственно расход топлива и температура за КД

## THE DESIGNING PRINCIPLES OF AFTERBURNER SYSTEM FOR HIGH EFFICENCY VAPOUR GAS MACHINE BASED ON NK-37 ENGINE

© 2007 A. M. Posthikov, Yu. I. Tsibizov, V. M. Belkin, V. I. Vasiliev, V. P. Chikin

JSC SNTK named by N. D. Kuznetsov

The high efficiency of using of the aeroengine afterburner operating process organization principles while designing afterburning chambers for the combined-cycle plant is shown in the article. The main technical solutions of such afterburning chambers design and approaches to fueling automated control system algorithm development is given as well.