

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 мг/м^3 и монооксида углерода CO не более чем на 50 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°C до плюс 45°C)).

В табл. 1 представлены результаты термодинамического расчета камеры дожигания (КД). Видно, что в реальном диапазоне изменения температуры на входе в двигатель от -30°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 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 топливоздушная смесь 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 ²	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

затора), 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.

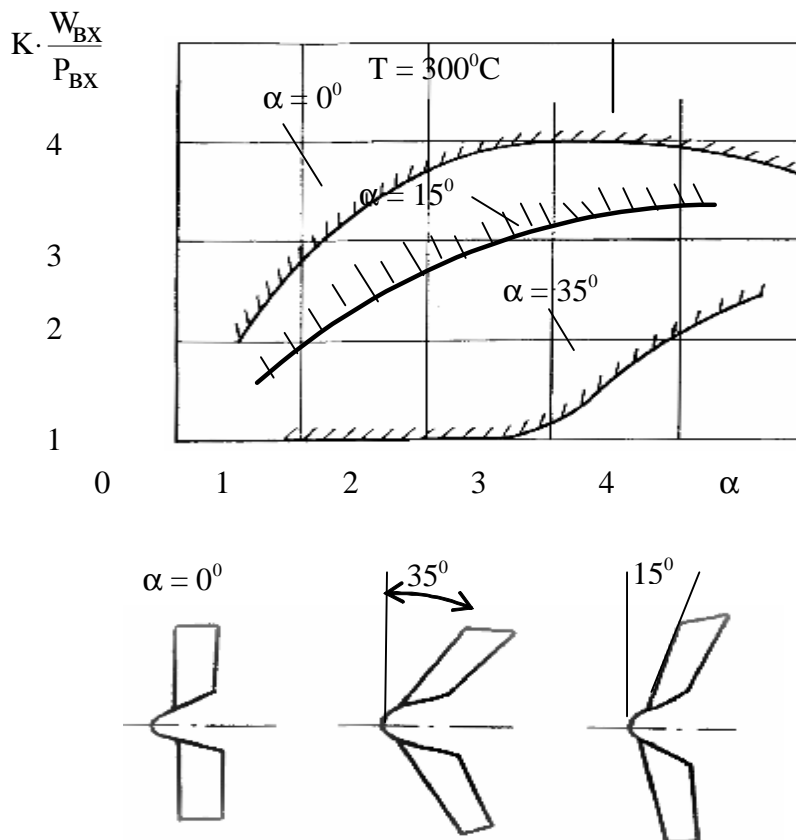


Рис. 1. Влияние на устойчивость горения угла наклона поперечных стабилизаторов пламени:

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

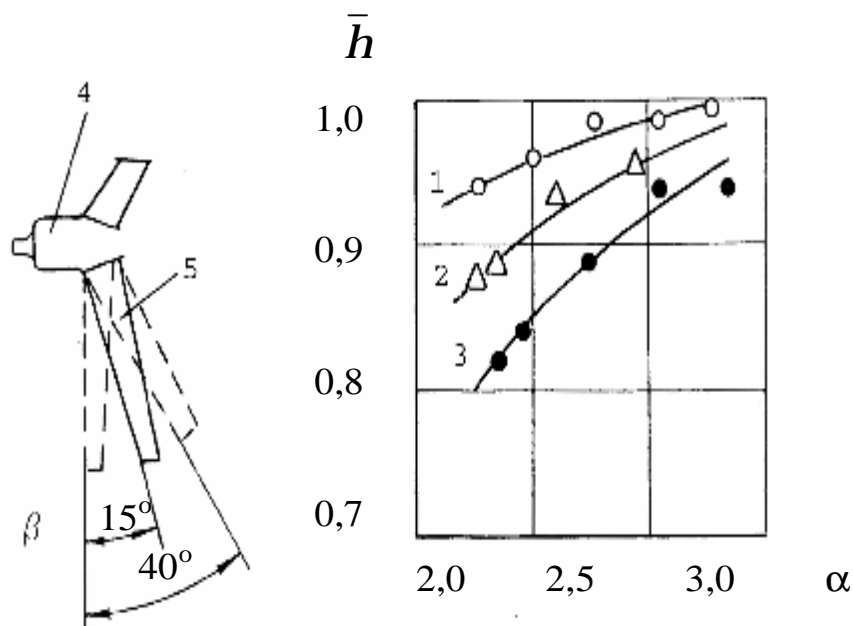


Рис. 2. Влияние угла наклона поперечного стабилизатора на полноту сгорания топлива системы стабилизаторов пламени:

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

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

4 – базовый продольный стабилизатор; 5 – поперечный стабилизатор;

1 – приведенная скорость потока; \bar{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-

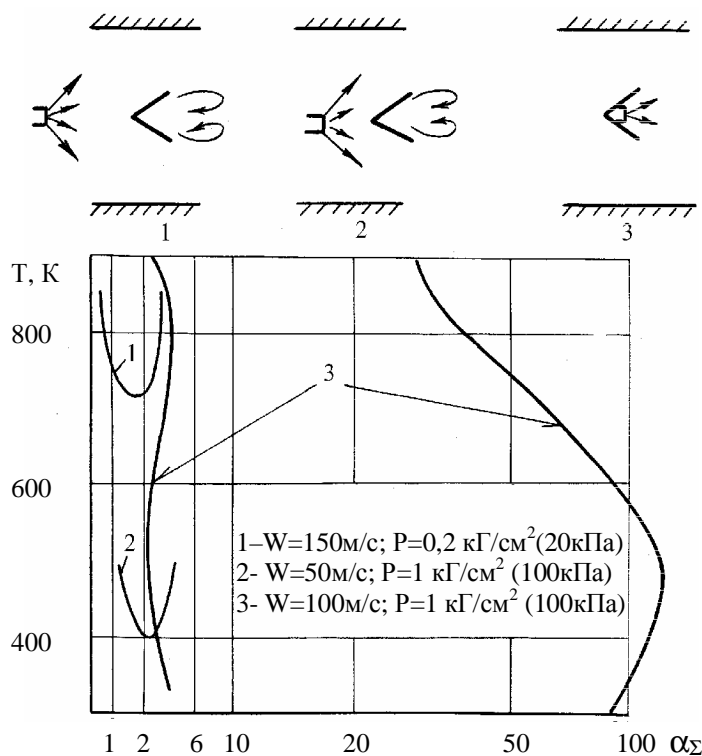


Рис. 3. Влияние параметров потока W , T , P и распределения топлива на границы срыва пламени:
 1, 2 – подача топлива на уголок: 1 – центробежная форсунка, 2 – струйная форсунка;
 3 – карбюратор (подача топлива под уголок); D – ширина уголка

менителей со свечами, фотодатчиков, термодатчиков 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°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

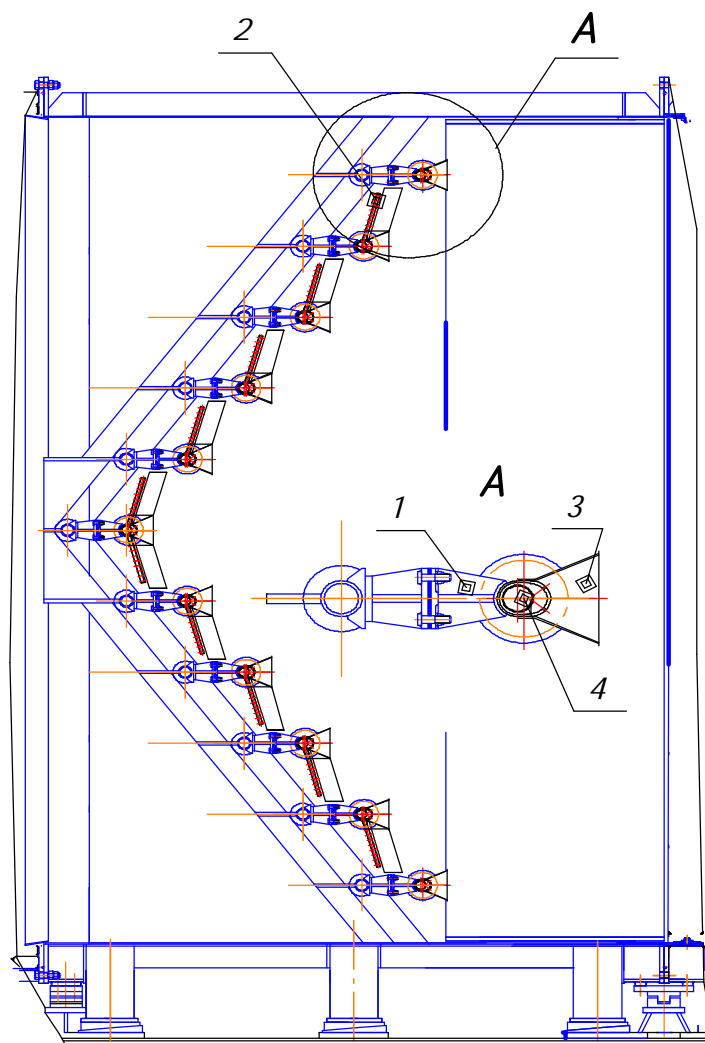


Рис. 4. Конструктивная схема камеры дожигания:

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_{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.

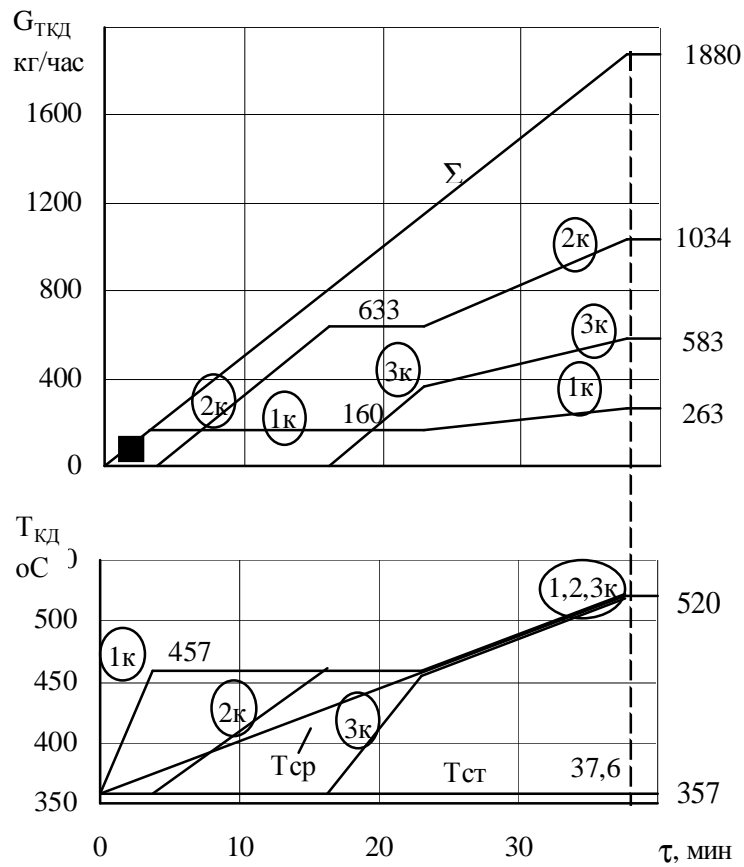


Рис.5. Циклограмма выхода на режим

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

Цифры у кривых – соответственно расход топлива и температура за КД