

УДК 622.61

СИГАЛ А.И., БЫКОРЕЗ Е.И.

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО БАЛЛАСТИРОВАНИЯ НА ТЕРМОДИНАМИКУ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Наведено результати експериментальних досліджень щодо введення балласту в зону горіння на експериментальному стенді на базі топки котла теплопродуктивністю 9 кВт. Подано графічні залежності термодинамічної ефективності баластування зони горіння від витрати баластів та їх кількості. На основі результатів експериментів одержано залежність, що дає можливість порівняти термодинамічну ефективність баластів з різним співвідношенням пароповітряної суміші і оцінити можливість зниження максимальної температури факела та зниження утворення оксидів азоту.

Приведены результаты экспериментальных исследований по введению балласта в зону горения на экспериментальном стенде на базе топки котла теплопроизводительностью 9 кВт. Представлены графические зависимости термодинамической эффективности балластирования зоны горения от расхода балластов и их количества. На основе результатов экспериментов получена зависимость, дающая возможность сравнить термодинамическую эффективность балластов с различным соотношением паровоздушной смеси и оценить возможности снижения максимальных температур факела с соответствующим снижением образования оксидов азота.

The results of experimental investigation on insertion of ballast in combustion zone of boiler furnace of the test unit with the heating efficiency 9 kilowatt are given. Graphical dependencies of thermodynamic effectiveness of ballasting of combustion zone from ballast consumption and their quantity are given. On the basis of results of experiments the dependence is got which gives the possibility to compare the thermodynamic effectiveness of the ballasts with the different proportion of aero-steam mixture and evaluate the possibilities of decreasing of the maximum flame temperatures with the appropriate decreasing of nitrogen oxide forming.

$B$  – расход топлива;

$C_T$  – удельная теплоемкость топлива;

$C_b$  – удельная теплоемкость балласта;

$G_b$  – массовый расход балласта, вводимого в зону горения;

$G_T$  – расход топлива;

$k$  – коэффициент пропорциональности выделения теплоты сжигания топлива на нагрев балласта;

$n$  – число компонентов балласта;

$T$  – максимальная фактическая температура пламени;

$T_{\max}$  – максимальная возможная температура пламени для данной топливовоздушной смеси при  $\alpha = 1,0$ ;

$T_0$  – начальная температура пламени;

$Q_T$  – количество теплоты, выделяемое при горении топлива;

$Q_b$  – количество теплоты, воспринимаемое балластом;

$q_T$  – количество теплоты, выделяемое при горении единицы топлива;

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха.

**Индексы:**

б – балласт;

в – воздух;

п – пар;

т – топливо;

тс – топливная смесь.

Методы балластирования зоны горения углеводородных пламен с целью снижения максимальных температур в топках котлоагрегатов часто носят комплексный характер. Балластирование воздухом практически всегда имеет место, т.к.  $\alpha > 1,0$  практически для всех без исключения котлоагрегатов. В дополнение к воздуху, в

качестве балластов используются вода [1] или пар [2] (впрыск воды или пара), также балластирование продуктами сгорания [3, 4] (рециркуляция), балластирование избыточным топливом и воздухом на разных стадиях многостадийного сжигания, а также их различные сочетания. Взаимное влияние различных балластов имеет важ-



Рис. 1. Экспериментальный стенд.

ное значение при их комплексном использовании.

Проведенные на экспериментальном стенде (рис. 1) исследования позволяют проанализировать некоторые особенности комплексного балластирования зоны горения, исключив влияние различных режимных и конструктивных факторов, свойственное топкам разных котлов.

Рассмотрим случай однокомпонентного балластирования. На рис.2 представлены зависимости изменения температуры фронта пламени от расхода балласта при балластировании факела воздухом с начальной температурой 373 К (прямая 1) и насыщенным водяным паром с начальной температурой 373 К, при  $\alpha = 1,0$  (прямая 2).

Функция  $\frac{T}{T_{\max}}$  характеризует отношение максимальной фактически измеренной температуры фронта пламени к максимально возможной теоретической для данной топливовоздушной смеси при  $\alpha = 1,0$ . Аргумент  $\frac{G_b}{B}$  представляет собой отношение массового расхода балласта (пар или избыточный воздух), вводимого в зону горения, к расходу топлива.

В этом случае обе зависимости носят линейный характер и берут начало в одной точке, соответствующей отсутствию балласта, с координатой  $\frac{T}{T_{\max}} = 1,0$ . Из рис. видно, что для снижения

максимальной температуры фронта пламени до определенного уровня необходимо подать в реакционную зону существенно различное количество балласта (в данном случае пара или воздуха) и эта разница пропорциональна удельным теплоемкостям (в представленных координатах – массовым). Используя принятые на рисунке обозначения, представим семейство прямых в аналитическом виде:

$$\frac{T}{T_{\max}} = \frac{kG_b}{B+b} \quad (1)$$

С учетом того, что  $b = 1$  уравнение (1) примет вид:

$$\frac{T}{T_{\max}} = \frac{kG_b}{B+1} \quad (2)$$

Коэффициент  $k$  численно равен тангенсу угла наклона прямых к положительному направлению оси  $\frac{G_b}{B}$ :

$$k = \left(1 - \frac{T}{T_{\max}}\right) \frac{G_b}{B} \quad (3)$$

С учетом соотношений:

$$Q_T = q_T B = C_{Tc} G_{Tc} (T_{\max} - T_0), \quad (4)$$

$$Q_b = C_b G_b (T - T_0), \quad (5)$$

$$Q_b = C_{Tc} G_{Tc} (T_{\max} - T_0), \quad (6)$$

получим

$$\begin{aligned} k &= \frac{\left(1 - \frac{T}{T_{\max}}\right) (T_{\max} - T_0) C_{Tc} G_{Tc}}{G_b q_T} = \\ &= -\frac{Q_b (T_{\max} - T_0)}{Q_b q_T T_{\max}} = -\frac{C_b (T - T_0) (T_{\max} - T_0)}{q_T T_{\max}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Приняв для упрощения  $T_0 = 0$ , получим:

$$k = -\frac{C_b T}{G_T} \quad (8)$$

Из (8) видно, что с учетом зависимости удельной теплоемкости балласта от температур  $C_6 = f(T)$  выражение (1), строго говоря, характеризует семейство кривых, а не прямых, однако для практических целей, с учетом незначительной минимальной ошибки ( $\delta T_{\max}$ ) на определенном участке экспериментальные данные можно аппроксимировать прямыми линиями.

Сравнивая термодинамическую эффективность применения различных балластов, с учетом равенства конечных температур продуктов сгорания и удельных теплотворных способностей используемых топлив, можно сделать вывод о том, что они прямо пропорциональны с коэффициентом пропорциональности  $k$ , при условии постоянства удельной теплоемкости для данного балласта.

Физический смысл коэффициента пропорциональности  $k$  можно выяснить, представив выражение (8) в виде:

$$k = -\frac{q_6}{q_T}, \quad (9)$$

здесь  $q_6 = C_6 T = \frac{Q_6}{Q_T}$  — величина, характеризую-

щая количество теплоты, необходимое на нагрев единицы массы балласта до температуры  $T$ . Условно эту величину можно назвать удельной интегральной теплоемкостью. Тогда, приняв удельную теплотворную способность топлива равной единице, можно сказать, что коэффициент  $k$  — это доля количества теплоты, выделившейся при сжигании топлива, затраченная на нагрев балласта до конечной температуры продуктов сгорания. Подставим полученное ранее выражение (9) для  $k$  в уравнение (2):

$$\frac{T}{T_{\max}} = 1 - \frac{q_6 G_6}{q_T B}, \quad (10)$$

с учетом вышеприведенных соотношений:

$$\frac{T}{T_{\max}} = 1 - \frac{Q_6}{Q_T}. \quad (11)$$

Таким образом, при  $C_6 = \text{const}$  температура фронта пламени, с термодинамической точки зрения, является функцией расхода балласта.

Рассмотрим более сложный случай комплексного многокомпонентного балластирования. В этом случае удельная теплоемкость комплексного балласта является функцией расходов компонентов, его составляющих и представляет собой теплоемкость смеси (рассматривается случай гомогенной смеси). В общем случае для  $n$  — компонентного балласта можно записать:

$$C_6 = \frac{\sum^n (G_n C_n)}{\sum^n G_n}, \quad (12)$$

где  $\sum^n G_n = G_6$ .

Тогда соответственно изменится зависимость максимальной температуры фронта пламени от расхода балласта.

Подставим (12) в (9):

$$\frac{T}{T_{\max}} = 1 - \frac{T \sum^n (G_n C_n)}{q_T B} \quad (13)$$

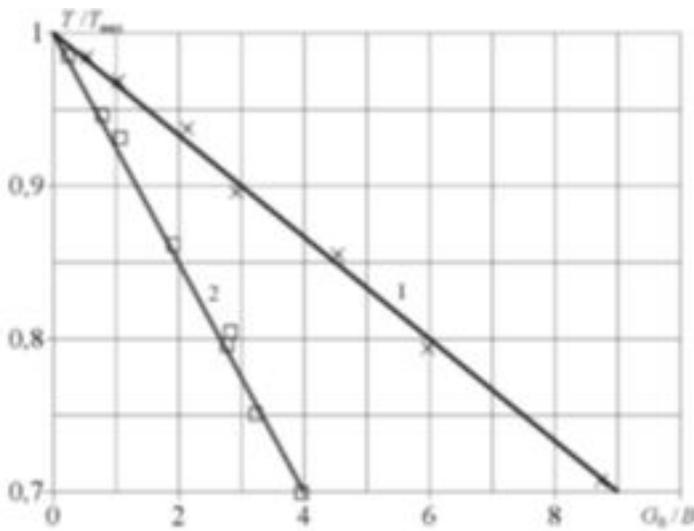
и преобразуем полученную функцию к явному виду, с учетом вышеприведенных соотношений:

$$\frac{1}{T_{\max}} = \frac{1}{T} = \frac{\sum^n (G_n C_n)}{Q_T}, \quad (14)$$

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_{\max}} + \frac{\sum^n (G_n C_n)}{Q_T}}, \quad (15)$$

$$T = \frac{T_{\max} Q_T}{Q_T + T_{\max} \sum^n (G_n C_n)}. \quad (16)$$

В результате мы получили зависимость  $T$  от  $n$  независимых переменных  $G_n$ . Определить закономерности поведения такой функции аналитическим путем при  $n > 1$  достаточно сложно.



**Рис. 2. Термодинамическая эффективность балластов с разной удельной теплоемкостью:**  
 □ – пар  $T = 373 \text{ К}$   
 $\alpha = 1,0$ , × – воздух  $T = 373 \text{ К}$ .

С целью упрощения, рассмотрим случай комплексного балластирования со следующими ограничениями:

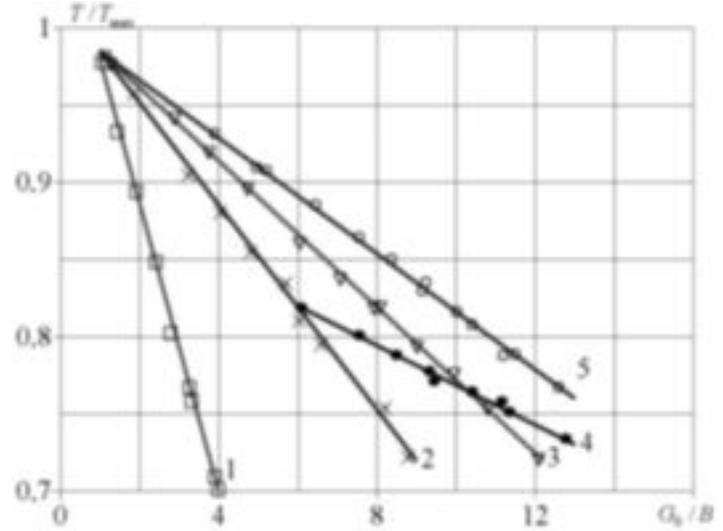
- балласт двухкомпонентный: водяные пары и воздух;
- переменным является расход только одного из компонентов балласта – водяного пара.

Удельная теплоемкость такого балласта, согласно (12),

$$C_0 = \frac{G_n C_n + G_b C_b}{G_n + G_b} \quad (17)$$

На рис. 2 представлены зависимости изменения максимальной температуры фронта пламени от расходов одного из компонентов применяемых балластов.

Первые две из этих зависимостей характеризуют однокомпонентное балластирование и были подробно описаны выше. Здесь важным является тот факт, что они пересекаются в точке, характеризующей отсутствием балласта. Три следующих прямых имеют ряд особенностей. Каждая из них берет начало на прямой 2 (балластирование воздухом), т.е. максимуму температуры соответствует точка, характеризующая отсутствием подачи пара при соответствующем  $\alpha$ . С началом подачи пара максимальная температура фронта пламени



**Рис. 3. Термодинамическая эффективность балластирования зоны горения воздухом и паром при разных  $\alpha$ :**  
 □ – 1 – пар  $T = 373 \text{ К}$ ,  $\alpha = 1,0$ ;  
 × – 2 – воздух,  $T = 373 \text{ К}$ ;  $\Delta$  – 3 – пар,  $T = 373 \text{ К}$ ,  
 $\alpha = 1,03$ ; ● – 4 – пар,  $T = 373 \text{ К}$ ,  $\alpha = 1,12$ ;  
 ○ – 5 – пар,  $T = 373 \text{ К}$ ,  $\alpha = 1,12$ .

снижается, причем чем выше  $\alpha$ , тем менее интенсивно это снижение при соответственно более низком исходном уровне. Немаловажным является также то, что наиболее интенсивное термодинамическое воздействие водяные пары, как балласт, оказывают при  $\alpha$ , близких к 1,0, поскольку химико-кинетическое воздействие уже при  $\alpha = 1,03$  балластирование водяным паром менее эффективно с точки зрения термодинамики, чем соответствующее балластирование воздухом.

Подставим (17) в (13):

$$\frac{T}{T_{\max}} = 1 - \frac{T(G_n C_n + G_b C_b)}{q_T B} \quad (18)$$

В этом уравнении мы имеем одну зависимую переменную  $T$  и одну независимую  $G$ . Постоянный расход воздуха для каждого определяет угол наклона и соответствующее смещение прямых 3-5 (рис. 3).

Для удобства сравнения и практического использования прямые 1, 3-5 целесообразно представить в координатах

$$\frac{T}{T_{\max}} = f\left(\frac{G_n}{B}\right) \alpha = \text{const} \quad (19)$$

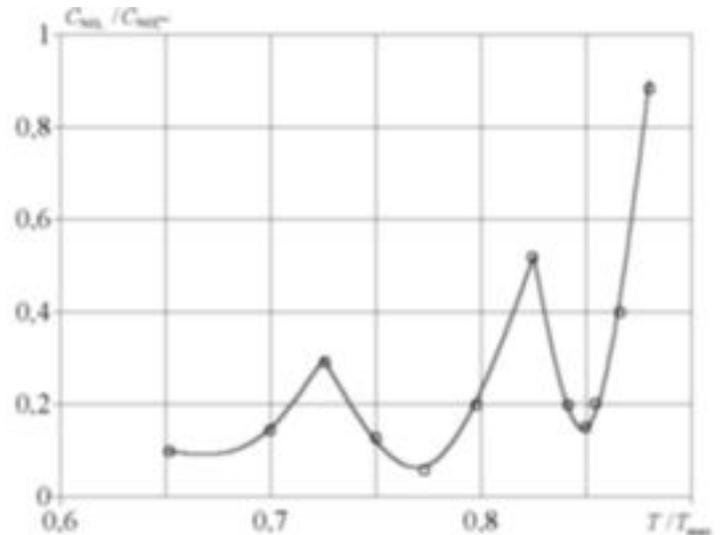
Примем тангенс угла наклона прямой 1 на рис. 3 ( $\alpha = 1,0$ ) равным 1,0, тогда все остальные прямые можно рассматривать относительно прямой 1, исключая при этом влияние других факторов на взаимное расположение прямых.

Таким образом, используя формулу (18), можно найти любую точку на плоскости, описываемой уравнением (19). Это дает возможность сравнить термодинамическую эффективность балластов с различным соотношением водяной пар/воздух.

Учет этого соотношения важен для оценки возможности снижения максимальных температур и уменьшения образования оксидов азота. При этом немаловажной является возможность проанализировать как влияние однокомпонентных, так и многокомпонентных балластов при различных соотношениях расходов одного из составляющих балласта, а с точки зрения практического использования – при различных.

Еще одним существенным преимуществом приведенных зависимостей является то, что они построены в относительных координатах, что исключает влияние таких параметров, как теплотворная способность и расход топлива, т.к. соответствующим образом изменяются и аргумент, и функция, но при этом принятое допущение о том, что тангенс угла наклона исходной прямой, соответствующей балластированию водяным паром при  $\alpha = 1,0$ , равен единице, компенсирует возможную диспропорцию, а все остальные зависимости следует рассматривать относительно этой прямой.

На практике, помимо наличия постоянного балластирования зоны горения воздухом ( $\alpha > 1,0$ ), часто встречаются и другие виды балластирования, обусловленные не столько целями снижения вредных выбросов в атмосферу, сколько технологическими нуждами. Если применяемые для обеспечения заданных режима горения и параметров теплоносителя меры не обеспечивают снижения максимальных температур для наиболее эффективного уменьшения образования оксидов азота, то представляется целесообразным либо дополнительное применение более энергоемкого балласта, либо перераспределение соотношения расходов составляющих балласта в сторону большей энергоемкости до достижения необходимого уменьшения температур. Таким



**Рис. 4.** Содержание  $NO_x$  в продуктах сгорания метана при балластировании зоны горения паром ( $\alpha = 1,02$ ).

образом, у разработчиков появляется возможность добиться необходимого снижения максимальных температур при поддержании заданных параметров теплоносителя и минимальном снижении либо сохранении КПД котлоагрегата.

В процессе анализа результатов проведенных исследований обнаружены эффекты увеличения выхода  $NO_x$  в некоторых температурных интервалах. Общепринятая в настоящее время зависимость  $NO_x = f(T)$  является, как известно, гладкой кривой экспоненциального характера, при обработке результатов экспериментов с подачей пара в качестве балласта на кривой  $NO_x = f(T)$  выявлены по крайней мере два пика с максимумом при температурах 1893К, 2013К (рис. 4). Так как при балластировании воздухом амплитуда пиков незначительна, а при балластировании паром весьма существенна, то можно сделать вывод о связи пиков выхода  $NO_x$  с вводом влаги в зону горения.

Рассмотрим одно из возможных объяснений этого явления. Известны несколько механизмов реакции, по которым возможно образование  $NO_x$  при горении углеводородных топлив. Интенсивность протекания каждой из реакций, входящих в эти механизмы, определяется концентрацией реагирующих веществ и температурой. Большинство известных реакций образования  $NO_x$  идет с участием радикалов. Если радикал

вызывает образование двух или более других радикалов, т.е. цепная реакция становится разветвленной, тогда появляется возможность быстрого увеличения концентрации радикалов, что приводит к чрезвычайному ускорению общей реакции [5]. Несмотря на то, что параллельно могут идти и ограничивающие цепь реакции, в такой сложной реакционной системе, как горение углеводородного топлива, на различных участках возможно преобладание различных элементарных реакций при определенных условиях.

Внося пар в зону горения, с точки зрения химической кинетики мы увеличиваем концентрацию радикалов Н и ОН. При этом, вероятно, происходит интенсификация многих реакций, идущих с участием этих радикалов. Однако мы не наблюдаем «всплеска» образования  $\text{NO}_x$  тотчас же, т.к. известно, что в процессе горения углеводородного топлива образуется примерно 18% воды, часть которой вносится вместе с воздухом. Сопоставив образующееся в процессе горения и вносимое исходно в виде пара количество влаги, видно, что первый со стороны максимальных температур пик образования  $\text{NO}_x$  соответствует двукратному увеличению количества влаги в зоне реакции. В связи с чем можно сделать вывод о том, что существует своеобразный «концентрационный» предел искусственно вносимой влаги, при котором происходит резкая интенсификация реакций, приводящих к образованию  $\text{NO}_x$ . Дальнейшее увеличение количества вводимого пара и соответственно повышения концентрации радикалов Н и ОН не приводит к увеличению выхода  $\text{NO}_x$ , т.к. все возможные пути разветвления реакций уже задействованы и увеличение количества вводимой влаги приводит лишь к снижению температуры горения и, как следствие, к экспоненциальному снижению концентрации оксидов азота в продуктах сгорания. Таким образом, два противоречивых механизма: снижение максимальной температуры горения, с одной стороны, и искусственное увеличение концентрации радикалов Н и ОН, с другой стороны, вероятно, обуславливают образование первого со стороны максимальных температур пика выхода  $\text{NO}_x$ .

Дальнейшее увеличение количества вводимого в зону горения пара приводит к заметному уве-

личению геометрических размеров факела, что обуславливает нарастание времени пребывания реагирующих веществ в зоне высоких температур. В свою очередь этот фактор способствует некоторому увеличению выхода  $\text{NO}_x$ . После чего преобладающее влияние снова оказывает снижение максимальной температуры, т.к. дальнейшее увеличение количества вводимого пара приводит к понижению абсолютной температуры фронта пламени до 1673К и ниже. Таким образом, увеличение выхода  $\text{NO}_x$  в зоне пониженных температур объясняется, вероятно, существенным, примерно в 2 раза, увеличением времени пребывания реагентов при этих температурах.

### Выводы

1. Получена зависимость, с помощью которой можно определить целесообразность применения дополнительных мер по снижению образования оксидов азота или улучшению выгорания СО в пламени, и при этом из имеющегося арсенала таких мер выбрать наиболее эффективные для данных условий.

2. Применение насыщенного пара в качестве балласта в дополнение к избыточному воздуху даст возможность получить наибольший эффект снижения максимальных локальных температур при наименьшем объеме вносимого в факел балласта и, следовательно, минимальном изменении геометрии факела. В то же время, использование в качестве дополнительного балласта, например, газов рециркуляции, имеющих меньшую удельную теплоемкость и соответственно требуемого при этом большего их расхода для достижения того же термодинамического эффекта, приводит к существенному изменению геометрии факела и, как следствие, к перераспределению полей температур в топке котла при незначительном снижении максимальных локальных температур.

3. Изменение геометрии факела имеет важное значение для поддержания параметров топочного процесса и параметров теплоносителя.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сигал А.И. Влияние влаги в дутьевом воздухе на эффективность работы котлов промышлен-

ленной и коммунальной энергетики // Сб.: Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики. Севастополь. – 2004. – С. 66 – 74.

2. *Изгорев О.Ю.* Снижение образования оксидов азота в топке котлоагрегата ТГМП-314 А методом комплексного балластирования зоны горения // Проблемы контроля и защиты атмосферы от загрязнения. – 1992. – №17. – С. 64– 66.

3. *Кормилицын В.И.* Экологические аспекты сжигания топлива в паровых котлах. – М.: МЭИ, 1998. – 360с.

4. *Сігал О.І., Бикоріз Є.Й.* Вплив вологи, як складової топкових баластів на процес утворення окислів азоту // Сб.: Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики. Севастополь. – 2005. – С.37 – 44.

5. *Fenimore C.P.* Formation of nitric oxide in premixed flames. 14-th Symp. (Int.) on Combust., The Combust. Inst., 1973. – p. 739 – 753.

*Получено 27.04.2007 г.*