УДК 662.61:519.711

НИЗКОЭМИССИОННОЕ СЖИГАНИЕ ПОДГОТОВЛЕННЫХ ГАЗО - ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В КАМЕРЕ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Сорока Б.С.[1], Згурский В.А.[1], Хинкис М.[2]

[1]*Институт газа НАН Украины, Киев,Украина*
[2]*Gas Technology Institute (GTI), Des Plaines, USA*

АННОТАЦИЯ

С помощью метода CFD моделирования рассмотрено образование токсичных оксидов азота NO и углерода CO при сжигании подготовленной смеси природного газа (метана) с воздухом в условиях цилиндрической камеры сгорания.

В качестве факторов подавления выхода NO (NO_x) рассмотрена рециркуляция продуктов сгорания, дополнительно обеспечиваемая установкой рециркуляционного стакана внутри камеры, а также любое увлажнение воздуха – окислителя.

Установлено, что при совместном воздействии обоих упомянутых факторов удается существенно (в 4.3 – 4.5 раз) понизить концентрацию NO в продуктах сгорания даже при малом (20.4 г/кг сухого воздуха) содержании водяных паров в воздухе.

Важным достоинством такого подхода является также сопутствующее понижение выходной концентрации CO на срезе камеры – на 25 – 30 % , а недостатком – некоторое снижение энергетической эффективности камеры сгорания.

ВВЕДЕНИЕ

Основные пути снижения вредных выбросов при сжигании органического топлива в энергетических и промышленных агрегатах были установлены в 60–80-е годы 20 ст. [1,2] на основе изучения физико-химических закономерностей и механизмов горения, а также кинетики образования вредных веществ при окислении топлива, прежде всего, углеводородов, в широком диапазоне температур [3].

Найденные закономерности образования вредных выбросов позволяют выработать технические приемы и способы снижения образования токсичных веществ в различных технологиях использования органического топлива. Так, для снижения образования оксидов азота (NO_x) предложены различные способы организации процесса горения, а также конструкции топочных и горелочных устройств для случаев использования твердого, жидкого и газообразного топлива [1–4]: рециркуляция продуктов сгорания (в топку, факел, горючее, окислитель); двух- и многоступенчатое сжигание; сжигание с малым избытком воздуха, снижение теплонапряженности и температуры факела (топки), уменьшение подогрева воздуха горения. Среди способов снижения вредных выбросов – впрыск пара или воды в топку (факел), а также работа горелок на водо-мазутной эмульсии; использование топлив с малым содержанием химически связанного азота.

КОМБИНИРОВАНИЕ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

Наилучший эффект достигается комбинацией различных методов снижения выбросов из числа перечисленных выше [5].

В частности, способ (FIR) и устройства (FIRB) принудительной внутренней рециркуляции газов в горелке, предложенный *M.Khinkis*, использует сочетание двухстадийного сжигания газового топлива с неизотермической рециркуляцией продуктов незавершенного горения в условиях охлаждения смеси [6]. При этом 1-я стадия – сжигание тщательно перемешанной богатой смеси ($\lambda \leq 0.7 – 0.9$), 2-я

стадия – диффузионное дожигание продуктов сгорания богатой смеси в системе воздушных струй. Ниже рассматривается анализ возможностей снижения образования NO_x, представленных NO как компонентом с наибольшей объемной долей, путем сочетания двух способов: организации рециркуляционного течения в камере сгорания и с использованием увлажнения воздуха горения.

1. Неизотермическая рециркуляция продуктов завершенного и незавершенного горения является известным и надежным средством понижения выбросов оксидов азота при сжигании топлива в условиях одно- и многоступенчатой организации процесса горения [7,8].

2. При замене сухого «холодного» воздуха в качестве окислителя на влажный наблюдается снижение образования оксидов азота. Такой эффект отмечается даже при невысоком абсолютном влагосодержании, соответствующем ненасыщенному состоянию при температуре окружающей среды (порядка d_a = 20г/кг сухого воздуха). На этом принципе базируются и индустриальные методы понижения выхода NO_x в энергоустановках, в том числе в котлоагрегатах и камерах сгорания ГТУ [9]. Вместе с тем обоснованный с физико-химических позиций анализ зависимости $[NO_x]_{ex}$ от параметров процесса (кратности рециркуляции, температуры и состава рециркулирующих газов), а также от определяющих режимных и конструктивных характеристик топочного устройства возможен только при рассмотрении кинетического механизма горения в условиях изменения перечисленных параметров и характеристик.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ CFD АНАЛИЗЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

С использованием компьютерного (CFD) моделирования, включающего решение системы уравнений переноса импульса, энергии (теплоты) и массы, с привлечением уравнений кинетики горения, а также механизмов образования NO_x выполнен анализ образования токсичных веществ – оксидов углерода CO и азота NO.

Для замыкания упомянутой системы уравнений используются предварительно выбранные модели турбулентности, горения и образования оксида азота.

При расчетах были опробованы различные механизмы горения с существенно отличным числом реагентов, для которых число учитываемых реакций варьировалось от 1 (1 step Eddy – Dissipation Mechanism) до 184 (30 компонент). Основные вычисления проведены с использованием модификаций механизма горения GRI – Mech версий 1.2 (далее DRM19) [10]. Из числа опробованных моделей турбулентности рассматривались модель рейнольдсовых напряжений (RSM), а также различные модификации $k - \varepsilon$ модели. Механизм образования NO принимался по Боумэну [3] и рассматривался как postproccesor, не оказывающий влияния на процессы переноса теплоты и массы, а также основные химические реакции при горении.

Исследования выполнены для осесимметричной геометрии горелочной системы при простейшей схеме сжигания природного газа с воздухом в условиях предварительно подготовленной смеси ГВС, подаваемой из центрального конического сопла, расположенного коаксиально цилиндрической камере сгорания КС (рис.1,а). Расчеты проводятся при граничных условиях 1-го рода: фиксированная температура стенок камеры: $T_w = const$, теплоотдача к стенкам определяется процессами переноса (лучисто-конвективного) в условиях химического реагирования (горения).

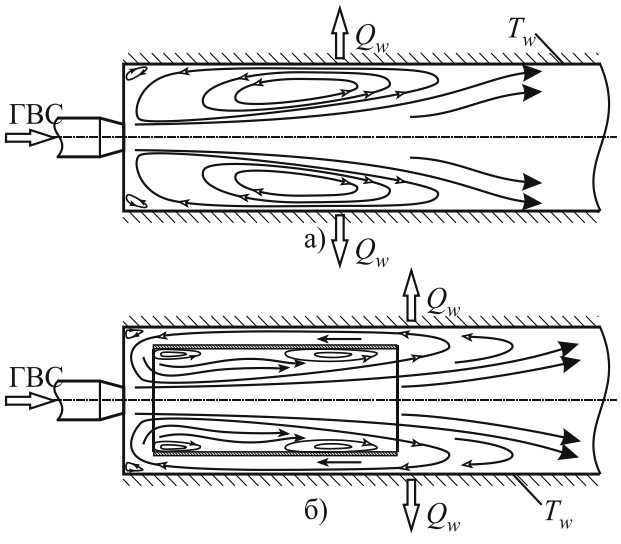

Рис.1 Картина течения продуктов сгорания подготовленной газовоздушной смеси (ГВС) в цилиндрической камере сгорания. а – $КС_В$ (без рециркуляционной вставки); б – $КС_{RS}$ (с рециркуляционной вставкой).

Выполнено сопоставление температурно-концентрационных характеристик факелов с учетом образования токсичных компонент: CO и NO – при сжигании подготовленной газо-воздушной смеси в описанной КС как таковой $-(КС)_{В}$, (рис.1,а). Кроме того проведены расчеты для камеры $КС_{RS}$ при размещении коаксиально стенкам КС рециркуляционного стакана (РС/RS), обеспечивающего за счет эжекционного эффекта вовлечение массового потока реагирующих или прореагировавших газов в горящий факел (рис.1, б).

Расчеты проводились при тепловой мощности КС 58.6 кВт ($2\cdot10^5$ Btu) = *idem*, соответствующей сжиганию массового потока метано–воздушной смеси $m_0 = 2.436\cdot10^{-2}$ кг/с (при коэффициенте избытка воздуха $\lambda = 1.15$). Из числа режимных параметров, кроме λ, в ходе исследований варьировались температуры стенок камеры T_w. Принималась равная температура горючей смеси T_0 и воздуха T_a: $T_0 = T_a = 300$K.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

На рис.2 по результатам CFD моделирования представлено распределение линий тока в КС для сравниваемых схем камеры: без рециркуляционной вставки (рис.2,а) и при ее установке (рис.2,б). Сильное изменение аэродинамики реагирующих газов ощутимо влияет на процесс горения.

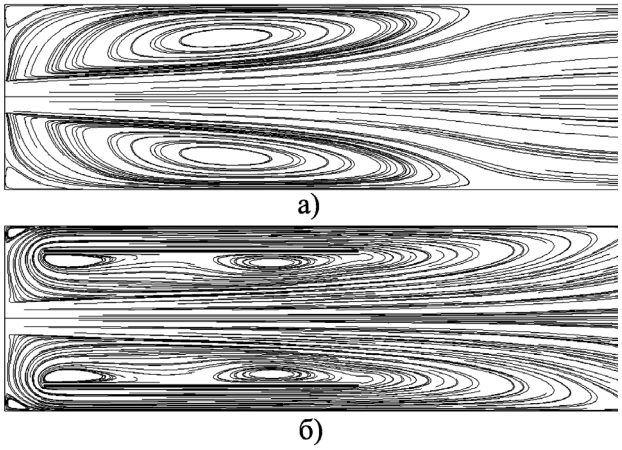

Рис.2 Распределение линий тока в камере сгорания по результатам CFD моделирования. Окислитель – сухой воздух, T_a = 300K, T_w = 1200K. а – без рециркуляционной вставки (РС); б – при установке РС.

В результате проведенных расчетов установлено сильное влияние использованных кинетических моделей на искомые значения [NO] и [CO]. Надежность полученных данных по этим компонентам в случае кинетических механизмов с малым числом реакций, по нашему мнению, не следует считать достаточной, особенно для одно- и двухступенчатой версий Eddy-Diccipation Mechanism. Это замечание относится к расчетам NO и особенно CO. В этой связи наш анализ базируется на расчетах с использованием DRM 19 –механизма [10].

Вместе с тем энергетические характеристики, включая распределение локальных тепловых потоков $q_w(l)$ по длине стенок топочной камеры, слабо зависят от выбранных моделей. Различие $q_w(l)$, рассчитанных при разных сочетаниях расчетных моделей, составляет порядка 3% (и менее) – на основной длине стенок и лишь в максимуме расхождение достигает 14 – 16% (рис.3).

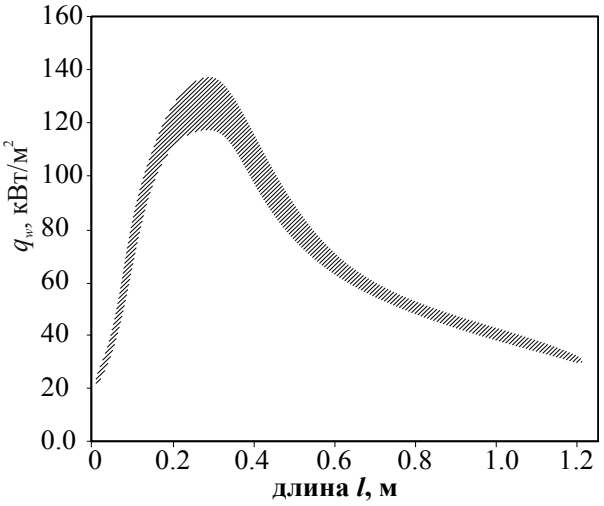

Рис.3 Область изменения локальных тепловых потоков на поверхности топочной камеры при использовании различных механизмов горения.

В соответствии с выполненным анализом во всем диапазоне проведенных расчетов разме-

щение рециркуляционной вставки коаксиально стенкам камеры сгорания вызывает улучшение экологических характеристик: $[NO]_{ex}$ и $[CO]_{ex}$ на срезе камеры сгорания уменьшается благодаря изменению кинетики реакций в горящем факеле.

На рис.4 представлено сравнение концентраций [OH] в объеме КС для базовой $КС_{В}$ и измененной $КС_{RS}$ конструкций. Резкое отличие характера концентрационных областей [OH] как индикатора окислительных реакций в сравниваемых конструкциях указывает на связь процессов переноса и турбулентного горения.

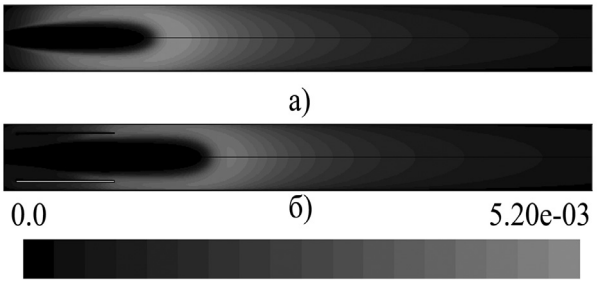

Рис.4 Распределения концентраций [OH] в объеме КС для базовой $КС_{В}$ (а) и измененной $КС_{RS}$ (б) конструкций. Окислитель – сухой воздух.

Установка вставки РС внутри КС, существенно изменив аэродинамику факела в камере (рис.2), вызвала изменение процесса горения и сопутствующего образования токсичных веществ (CO и NO).

В табл.1 представлены энергетические (теплотехнические) и экологические показатели сжигания метано–воздушной смеси в $КС_{В}$ и $КС_{RS}$ в зависимости от коэффициента избытка воздуха $0.9 \le \lambda \le 1.15$. Энергетические показатели представлены результирующим тепловосприятием Q_w боковой стенки КС и температурой $T_{fl,ex}$ в выходном срезе КС. Эти характеристики коррелированы между собой: $Q_w(\lambda)$, $T_{fl,(ex)}$ (λ) меняются качественно подобным образом. Экологические характеристики представлены концентрациями оксидов азота $[NO]_{ex}$ и углерода $[CO]_{ex}$, причем эти показатели рассматривались на срезе КС. Кроме того, по специальным программам определялись максимальные (индекс "*max*") и средние (индекс "*ave*") значения концентраций отдельных компонент в объеме КС.

Сильное влияние на образование NO при горении имеют режимные параметры. Так, коэффициент избытка воздуха λ в рассмотренном диапазоне $0.9 \le \lambda \le 1.15$ характеризуется экстремальным воздействием на $[NO]_{ex}$ с пиком при $\lambda \to 1.0$ (Табл.1), вероятнее всего соответствующим максимальному значению теоретической температуры горения $T_T(\lambda)$.

Установлено, что $[NO]_{ex}(\lambda)$, $[CO]_{ex}(\lambda)$ имеют противоположные экстремумы: первые – максимум, вторые – минимум концентрации. Окись углерода монотонно уменьшается при росте $\lambda \in \{0.9; 1.05\}$, а затем начинает возрастать при увеличении $\lambda \in \{1.06; 1.15\}$. Максимальная концентрация $[NO]_{max}$ внутри КС и $[NO]_{ex}$ на выходе из КС коррелированы со значениями $T_{fl,max}$ и $[OH]_{max}$, т.е. с максимальной температурой и максимальной концентрацией гидроксила OH в реагирующем объеме КС.

В той же табл. 1 рассматривается влияние увлажнения воздуха горения паром с содержанием d_a = 20.4г/кг сухого воздуха при температуре T_a = 300K. Указанное влагосодержание, соответствующее относительной влажности φ = 84%, вызывает некоторое, порядка 3 – 3.15% (отн.) понижение энергетической эффективности η_f КС, однако обеспечивает синергетический эффект с точки зрения сокращения токсичных выбросов.

Изучение экологических характеристик базовой схемы камеры сгорания и пламен, образованных при сжигании предварительно подготовленных холодных (T_0 = 300K) смесей природного газа с воздухом, выявило удовлетворительные показатели по выбросам оксидов азота NO в диапазоне изменения коэффициентов избытка воздуха $\lambda \in \{0.9; 1.15\}$. Эти показатели отвечают любым национальным и европейским нормативам для промышленных потребителей.

Установка рециркуляционных вставок коаксиально стенкам камеры сгорания обеспечивает некоторое (порядка 5%) повышение энергетической эффективности использования топлива при резком сокращении выбросов NO (NO_x) (в 2.5 – 3.25 раза) в рассмотренном диапазоне варьирования параметров процесса. Наблюдается также небольшое (10 – 12% в области стехиометрических и слабо обедненных смесей $1.0 \le \lambda \le 1.15$) сокращение выбросов CO за счет установки рециркуляционного стакана в камере сгорания.

На рис.5 представлены выходные концентрации $[NO]_{ex}$ и $[CO]_{ex}$ на срезе камеры сго-

Таблица 1. Энергетическая и экологическая характеристика сжигания метано-воздушной сменси на границах камеры сгорания: $[X_i]$, $T_{fl,ex}$ – выходной срез, Q_w – боковые стенки. T_w = 1200K, T_a = 300K.

Коэф. изб. воздуха λ	**1.15**	**1.05**	**0.95**	**0.9**	**1.15**	**1.05**
d_a	**0**	**0**	**0**	**0**	**20.4**	**20.4**
Конструкция	**без рециркуляционной вставки**					
NO, ppm	35.2	60.0	54.8	40.0	20.4	37.3
CO, ppm	99.6	502	12053	23302	75.2	414.3
CO_2, % об.	8.37	9.03	8.64	7.90	8.11	8.78
O_2, % об.	2.45	0.9	4.3E-03	3.18E-04	2.40	0.86
H_2, % об.	5.46E-03	0.0287	0.85	1.82	4.89E-03	0.028
OH, мольная доля	3.70E-04	5.37E-04	1.81E-04	6.91E-05	3.28E-04	5.00E-04
HO_2, мольная доля	2.81E-07	4.04E-07	1.34E-08	1.11E-09	2.66E-07	3.98E-07
O, мольная доля	1.74E-05	3.06E-05	3.67E-06	5.78E-07	1.31E-05	2.51E-05
$T_{fl,ex}$, K	1591	1623	1609	1585	1569	1605
Q_w, кВт	17.4	19.0	18.6	16.9	16.8	18.4
Конструкция	**с рециркуляционной вставкой**					
NO, ppm	13.6	22.7	19.1	12.2	7.9	14.0
CO, ppm	87	451	11865	23425	69.8	376.9
CO_2, % об.	8.35	9.04	8.66	7.91	8.11	8.79
O_2, % об.	2.48	0.898	0.0038	2.62E-04	2.40	0.861
H_2, % об.	4.82E-03	0.027	1.1	1.89	4.56E-03	0.026
OH, мольная доля	3.28E-04	4.91E-04	1.64E-04	6.04E-05	0.0303	0.0461
HO_2, мольная доля	2.87E-07	4.31E-07	1.27E-08	1.01E-09	2.75E-07	4.28E-07
O, мольная доля	1.54E-05	2.84E-05	3.29E-06	4.91E-07	1.23E-05	2.35E-05
$T_{fl,ex}$, K	1559	1591	1578	1556	1541	1574
Q_w, кВт	18.4	20.1	19.4	17.7	17.7	19.4

Примечание: d_a – абсолютная влажность, г H_2O / кг сухого воздуха; $[X_i] \equiv$ NO, CO, CO_2, H_2, OH, HO_2, O – объемная (молярная) концентрация компонента в смеси продуктов сгорания.

рания без рециркуляционного стакана в зависимости от абсолютного влагосодержания воздуха горения d_a, обусловленного относительной влажностью φ воздуха по отношению к насыщенному состоянию при температуре T_a = 300K (рис. 5,а) или определяемого точкой росы t_d по отношению к указанной температуре воздуха и горючей смеси в целом (рис. 5,б).

Температура теплоприемных стенок камеры сгорания T_w = 300K. Коэффициент избытка воздуха λ = 1.15. На правой шкале рис.5 указана относительная влажность воздуха φ, % (а) и температура точки росы t_d ,°C (б).

Существенным положительным эффектом рассматриваемого способа сжигания с точки зрения экологических показателей является одновременное снижение выбросов NO и CO. При этом при сжигании природного газа с насыщенным воздухом $[NO]_{ex}$ понижается в 1.82 раза, $[CO]_{ex}$ – в 1.31 раза по сравнению со случаем использования сухого воздуха-окислителя.

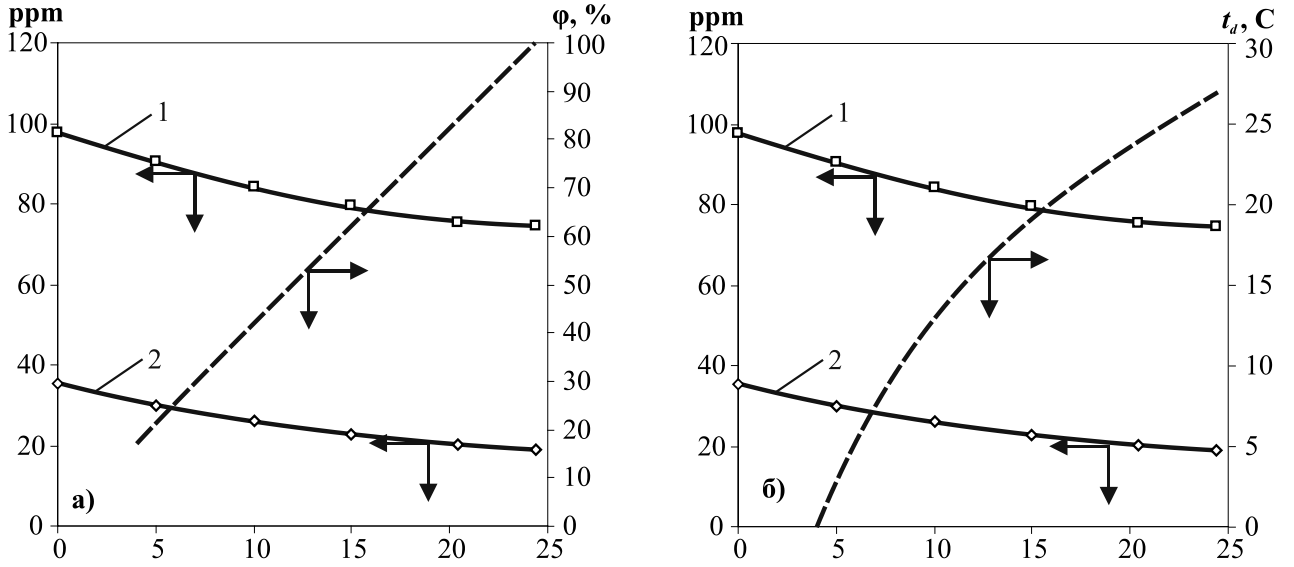

Рис.5 Зависимость концентрации [NO] и [CO] в продуктах сгорания подготовленной метано-воздушной смеси от влагосодержания воздуха горения. 1 – CO; 2 – NO.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ выполненных расчетов свидетельствует о повышении экологической эффективности сочетания отдельных методов подавления образования NO и CO при сжигании подготовленных смесей природного газа (метана с воздухом). Так, если дополнительная рециркуляция в КС за счет размещения рециркуляционной вставки внутри КС коаксиально стенкам камеры при T_w = 1200K уменьшает выходную концентрацию $[NO]_{ex}$ примерно в 2.6 раза, то совместное воздействие этого фактора и небольшого увлажнения воздуха горения (d_a = 20.4г/кг сухого воздуха) обеспечивает снижение $[NO]_{ex}$ в 4.3 – 4.5 раза. Само по себе увлажнение воздуха даже в указанных пределах позволяет понизить $[NO]_{ex}$ в 1.725 – 2.0 раза.

Качественно сходное влияние оказывают описанные изменения конструкции КС и организации процесса горения на другой контролируемый компонент – оксиды углерода. Несмотря на обычно отмечаемое противоположное воздействие отдельных факторов на образование NO и CO, в рассматриваемом случае оба использованных способа подавления NO понижают также выходную концентрацию CO на срезе КС, хотя и в меньшей степени. Дополнительная рециркуляция за счет установки вставки внутри КС сокращает $[CO]_{ex}$ на 10 – 12%, а увлажнение воздуха снижает образование CO на 17.5 – 24%. Совместное действие обоих факторов в указанных пределах может понизить концентрацию $[CO]_{ex}$ на 25 – 30%.

При анализе воздействия рассматриваемых факторов на энергетические показатели КС установлена возможность увеличения результирующего теплообмена и КПД η_f камеры $КС_{RS}$, оборудованной рециркуляционной вставкой, на 5.35 – 5.75% при сопутствующем понижении температуры газов на срезе КС. Незначительное увлажнение воздуха горения при его температуре 300K (в пределах влагосодержания до насыщения), напротив, само по себе понижает энергетическую эффективность КС как базовой конструкции без вставок $КС_В$, так и камеры $КС_{RS}$ с рециркуляционной вставкой на 3 – 4%. В целом при совместном использовании обоих рассматриваемых приемов сокращения выхода NO и CO можно говорить о возможности обеспечения экологически чистого сжигания природного в КС без потери энергетической эффективности топочных систем при указанном уровне d_a.

Чем выше рабочие температуры в КС, тем больше выход NO и CO. При снижении температуры стенок $КС_В$ от 1200 до 600K отмечается значительное понижение выходной концентрации $[NO]_{ex}$ для сухого и влажного окислителя: 7.04 – кратное при сухом воздухе горения, в 8.16 раз – при содержании пара d_a = 20.4 г/кг сухого воздуха.

© Сорока Б.С., Згурский В.А., Хинкис М.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лавров Н.В., Розенфельд Э.И., Хаустович Г.П. Процессы горения топлива и защита окружающей среды. – М.: Металлургия, 1981. – 240с. Lavrov, N.V., Rosenfeld E.I., Khaustovich G.P. *Processy goreniya topliva i zashchita okruzhayushchej sredy,* [Fuel combustion processes and environmental protection], Moscow, Metalurgy, 1981 –240p.
2. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива.– 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра, 1988. – 312 с. Sigal I. *Zashchita vozdushnogo basseyna pri szhiganii topliva*, [Air field protection by fuel combustion], – The 2nd ed. and added with complements, – Nedra, 1988. – 312p.
3. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени: Пер. С англ./Ред. Чигир Н.А. – М.: Машиностроение, 1981. – 407с. *Obrazovanie i razlozhenie zagrjaznjajushchih veshhestv v plameni*, [Pollution formation and destruction in flames], Vol.1/ Edited by N.A. Chigier – Pergamon Press Ltd, 1976. – 312pp.
4. Gregory D.P. Hydrogen Energy, Part B. New–York–London, 1975, P.1209 –1217.
5. Сорока Б.С., Пьяных К.Е., Згурский В.А., Апальков А.П. Комбинирование способов снижения образования оксидов азота при горении – основное направление обеспечения экологических нормативов // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2000, №5. – С.60 –69. Soroka B.S., Pyaykh K.Ye., Zgurskyi V.A., Apalkov A.P. *Kombinirovanie sposobov snizhenija obrazovanija oksidov azota pri gorenii – osnovnoe napravlenie obespechenija ekologicheskih normativov*, [Combination of reduction of nitrogen oxides formation techniques as the main trend of environmental standards provision by fuel combustion]// Ecotechnologies and Resource saving. – 2000, №5. – P.60 –69.
6. Soroka B., Khinkis M. Development and mathematical modelling of low-emission radiant tube/ III Medzinarodna conferencia (International Conference) "REFRARCTORIES, FURNACES & THERMAL INSULATIONS" / Proceedings. 8-10 June 2004. – Podbanske – High Tatry, Slovakia. – P.220-225.
7. Сорока Б.С. Развитие в Институте газа работ в области математического и компьютерного моделирования горения газа и топочных процессов // Энерготехнологии и ресурсосбережение. –2009, №4.– С.62 – 73. Soroka B.S. *Razvitie v Institute gaza rabot v oblasti matematicheskogo i komp'juternogo modelirovanija gorenija gaza i topochnyh processov*, [Performing of developments by gas institute of NASU in area of mathematical and cfd modelling of gas combustion and furnace processes] // Energy Technologies and Resource saving. –2009, №4. – P.62 – 73.
8. Al-Halbouni A., Hendrik R., Giese A. Entwicklung eines schadstoffemissionsarmen Brennerkonzepts für Industriekesselfeuerugen // GasWärme International (56) #6, 2007. – S. 416 – 419.
9. [Development of a low-pollutant-emissions burner concept for industrial boiler combustion systems]
10. Guillet R. Wet way combustion: energy efficiency, environmental protection / Elsevier, 2000, Paris. – 137 p.
11. A. Kazakov and M. Frenklach, http://www.me.berkeley.edu/drm/