

УДК 504.055:536.46:662.954

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССОВ “ВЛАЖНОГО” ГОРЕНИЯ И СОПУТСТВУЮЩЕЕ СОКРАЩЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ У КРАЇНИ

Сорока Б.С., докт. техн. наук, Згурский В.А., канд. техн. наук

Институт газа НАНУ, ул. Дегтяревская 39, г. Киев, 03113, Украина

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.8>

На основі CFD-моделювання та термодинамічного аналізу розглядаються шляхи підвищення ефективності використання природного газу та скорочення викидів оксидів азоту в умовах зволоження повітря горіння.

На основе CFD-моделирования и термодинамического анализа рассмотрены пути повышения эффективности использования природного газа и снижения выбросов оксидов азота в условиях увлажнения воздуха горения.

Grounded upon CFD-modeling and the thermodynamic analysis, the ways of enhancement the efficiency of using the natural gas and of nitrogen oxides effluents reduction are considered for the conditions of humidified combustion air.

Библ. 6, рис. 5, табл. 1.

Ключевые слова: влажное горение, вредные выбросы, кинетический механизм горения, КПД использования топлива, оксиды азота, термодинамический анализ.

[X], [CO], [NO], [NO_x] – концентрация компонента X, оксида углерода, оксида азота, оксидов азота;

d – абсолютное влагосодержание;

Q – тепловой поток, суммарный, кВт;

t, *T* – температура, °С, К;

η – КПД (efficiency) использования топлива;

λ – коэффициент избытка воздуха;

φ – относительная влажность;

Ω – массовое соотношение окислитель: топливо.

Индексы

a – воздух;

ch – перед подачей в вытяжную систему;

d – при насыщении (точка росы);

ex – на выходе из устройства, в частности на срезе топочной камеры;

en – на входе в тракт;

f – топливо;

fur – для топливной камеры (печи);

g – продукты сгорания;

r – для рекуператора.

sat – состояние насыщения;

st – стехиометрическое соотношение;

T – теоретическая температура;

φ – при относительной влажности *φ*.

Аббревиатуры

КС – камера сгорания;

УТУПС – утилизации теплоты уходящих из топок продуктов сгорания;

М-cycle – цикл Майсоценко;

WVP – *water vapor pump* – паровой насос.

Введение

Горение в условиях использования влажного воздуха в качестве окислителя – “wet combustion” – существенно меняет кинетический механизм процесса, включая образование вредных веществ, а также ход процессов переноса [1–3]. Поскольку интенсивность теплообмена, в первую очередь, определяется ходом температурных полей, формируемых процессом горения, “влажное горение” через абсолютное влагосодержание топливоокислительной смеси оказывает определенное негативное влияние на интенсивность теплообмена в топке (камере сгорания). При этом обеспечивается сокращение выброса вредных веществ, прежде всего – оксидов азота NO (возможно – на порядок). В настоящее время во многих странах проводятся исследования, результаты которых позволяют обеспечить повышение эффек-

тивности использования и сокращение расхода топлива за счет утилизации теплоты высокоэнтальпийных продуктов “влажного горения” в печах, котлах, ДВС и ГТУ [4–6]. Имеются указания на возможность успешного использования различных газовых топлив: от природного газа до биогаза и газов содержащих H₂ [4].

Институт газа является одним из пионеров изучения процессов «влажного горения». На протяжении последних десятилетий в Институте проводятся систематические исследования, которые включают теоретический анализ с привлечением методов равновесной термодинамики (первые публикации – 1993г.) и CFD моделирования, а также экспериментальные работы в условиях огневого стенда по энергоэкологической оценке роли увлажнения потока топливоокислительной смеси [5].

Экологические характеристики процесса влажного горения

Для выявления закономерностей образования токсичных выбросов: NO и CO – при сжигании подготовленной смеси природного газа (метана) с воздухом выполнен расчетно-теоретический анализ с привлечением методов CFD моделирования [2]. Исследования проведены при заданных расходах смеси $\dot{m}_0 = 2,436 \cdot 10^{-2}$ кг/с, тепловой мощности $Q_f = 58,6$ кВт, коэффициенте избытка воздуха $\lambda = 1,15$ в цилиндрической прямоточной камере сгорания КС со стенками, имеющими заданную и неизменную температуру $T_w = const = 1200$ К (рис. 1, б), то есть при граничных условиях 1-го рода. При этом теплоотдача конвекцией и излучением к стенке со стороны движущегося горящего потока определяется формированием полей скорости, температуры и концентраций.

Единственными варьируемыми параметрами при расчетах являются температура T_a и абсолютное влагосодержание воздуха-окислителя d_a : $T_a = 300$ К и 325К; d_a изменялось от 0 (сухой воздух) до значения $d_{a,sat}$, соответствующего насыщению при указанных температурах: 24,4 и 105,6 г/кг сухого воздуха – соответственно.

Основное внимание уделено экологическим характеристикам КС и теплоотдаче к стенкам камеры Q_w (рис.1,б).

Известно, что подогрев воздуха горения является важнейшим фактором экспоненциального роста [NO], однако слабое изменение T_a (от 300 до 325 К) влияет незначительно на рост NO (NO_x) в условиях сухого воздуха горения или при фиксированном $d_a = idem$ [2, 6]. Вместе с тем изменение подогрева воздуха всего на 25 К

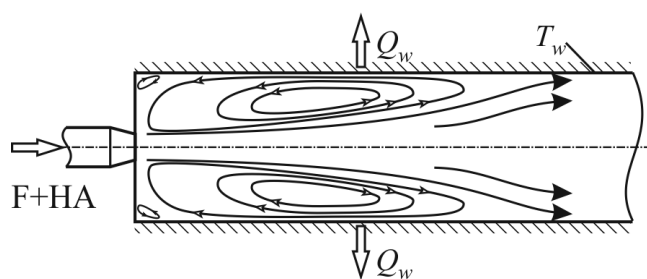
достаточно, чтобы резко сократить образование NO за счет возможности сопутствующего серьезного повышения влагосодержания до уровня насыщения $d_{a,sat}$, отвечающего T_a .

В рамках настоящей работы были опробованы различные механизмы горения с существенно отличающимся числом реагентов и учитываемых реакций. Опробованы механизмы, где количество реакций варьировалось от 1 (1 step Eddy – Dissipation Mechanism) до 184 (30 компонент). Основные вычисления проведены с использованием модификаций механизма горения GRI – Mech версии 1,2 (DRM19). Из числа опробованных моделей турбулентности рассматривались модель рейнольдсовых напряжений (RSM), а также различные модификации $k - \epsilon$ модели.

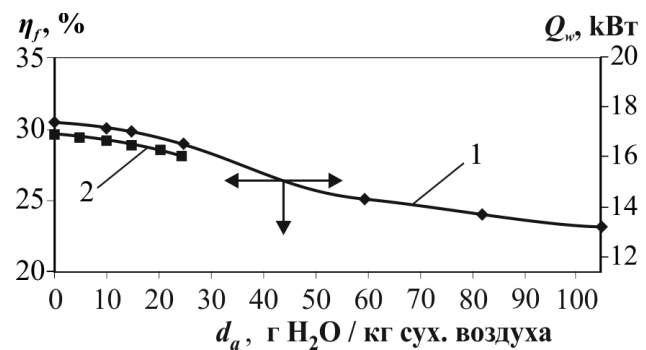
При анализе выхода NO и CO следует иметь в виду различные порядки величин этих компонент в продуктах сгорания: $[CO] \gg [NO]$. В этой связи CO как компонент обязательно должен присутствовать в числе составляющих реагирующей системы на всех этапах горения.

В то же время [NO] в силу малости содержания этого компонента в продуктах сгорания практически не сказывается на формировании температурных полей и процессов энергопереноса. В связи с этим при расчетах процесса горения могут использоваться упрощенные “reduced” механизмы без вовлечения оксидов азота в перечень реагентов горячей смеси.

Механизм образования NO принимался по Боумэну и рассматривался как postprocessor, не оказывающий



а)



б)

Рис. 1. а – картина течения газов в прямоточной камере сгорания, принятой для расчетов.

Исходная смесь, подаваемая на горение: F – топливо, HA – влажный воздух.

б – изменение КПД η_f , % (левая шкала) и воспринятого теплового потока стенками камеры сгорания Q_w , кВт (правая шкала), в зависимости от влагосодержания воздуха горения;

T_a : 1 – 325 К, 2 – 300 К. Состояние насыщения по абсолютному влагосодержанию $d_{a,sat}$ г/кг сух. воздуха: 1– 105,6; 2 – 24,4. $T_w = 1200$ К.

влияния на процессы переноса теплоты и массы, а также на основные химические реакции при горении [2].

В результате CFD моделирования процессов сжигания CH_4 с воздухом фиксированной температуры $T = \text{const}$ установлено монотонное сокращение выбросов оксидов азота (NO) и углерода (CO) по мере роста d_a . При $T_a = 300$ К в располагаемых пределах влагосодержания воздуха горения $d_a \in \{0; d_{a,\text{sat}}\}$ концентрация [NO] уменьшается в 1,86 раза – от 35,2 ppm до 18,9 ppm. При 325 К в связи с ростом $d_{a,\text{sat}}$ эти возможности резко увеличиваются: снижение [NO] более чем на порядок (от 39,3 ppm до 3,8 ppm) наблюдается уже при $d_a = 82,65$ г/кг сухого воздуха, что соответствует относительной влажности воздуха $\phi = 81\%$ (рис.2, а).

Указанное увеличение T_a (25 К) соответствует росту $d_{a,\text{sat}}$ более, чем в 4 раза. Естественно, что это приводит к росту доли H_2O в смеси исходных реагентов горения, снижению концентрации горючих и окислительных компонент в исходной смеси и росту содержания балласта. Следствием является понижение температуры горения, изменение кинетики горения и образования токсичных NO и CO.

Сравнение (рис. 2) изменения характеристики $[\text{NO}]_\phi / [\text{NO}]_{\phi=0}$ от относительной влажности воздуха-окислителя, проведенное при CFD моделировании топочной

камеры (рис.1) для случаев $T_a = 300$ и 325 К, с результатами расчетов термодинамически равновесных составов продуктов сгорания при T_T показало качественное сходство трендов при более существенно выраженном влиянии ϕ на выход NO, полученное при CFD моделировании и в эксперименте (рис.3).

На рис. 3 сопоставлено с результатами CFD моделирования, проведенного авторами, относительное изменение концентрации оксидов азота по результатам экспериментальных исследований, полученных фирмой MAN в условиях сжигания природного газа с влажным воздухом в двигателях [3]. Сравнение проведено в координатах “ $[\text{NO}_x] / [\text{NO}_x]_{\text{max}}$ – влагосодержание воздуха d_a ”. Значение d_a представлено в виде отношения массовых потоков $d_a = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} / \dot{m}_a$ при пересчете данных [3] с учетом массового стехиометрического числа $\Omega_{st} = 17,2$ кг сухого воздуха/кг CH_4 и коэффициента избытка воздуха $\lambda = 1,15$. Расчетные и опытные данные вполне удовлетворительно согласуются между собой, что указывает на приемлемость выбранного механизма горения природного газа (метана CH_4), а также упрощенной модели образования NO по механизму Зельдовича-Боумэна.

Удачным оказался процесс validation при сопоставлении расчетных данных и наших экспериментальных исследований [1, 6].

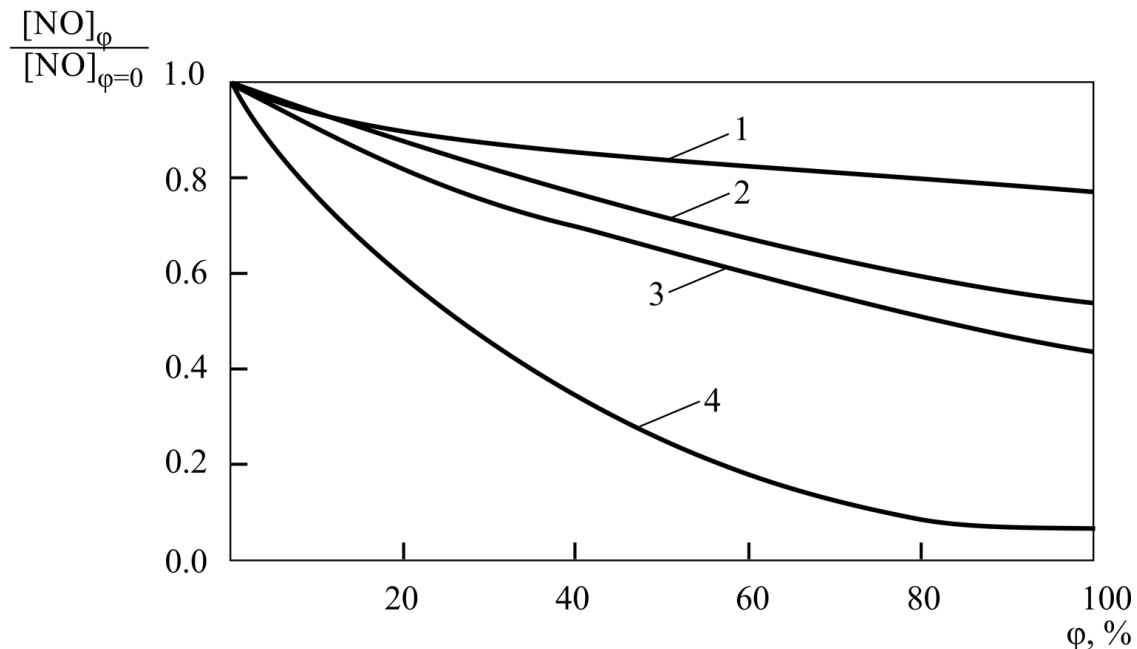


Рис. 2. Зависимость уменьшения относительной концентрации $[\text{NO}]_\phi / [\text{NO}]_{\phi=0}$ в продуктах сгорания смеси природного газа с воздухом от относительной влажности воздуха горения ϕ ; $\lambda = 1,15$.

Исходная температура воздуха горения T_a , К: 1,3 – 300; 2,4 – 325;

1,3 – по результатам термодинамического анализа; 2, 4 – по данным CFD моделирования.

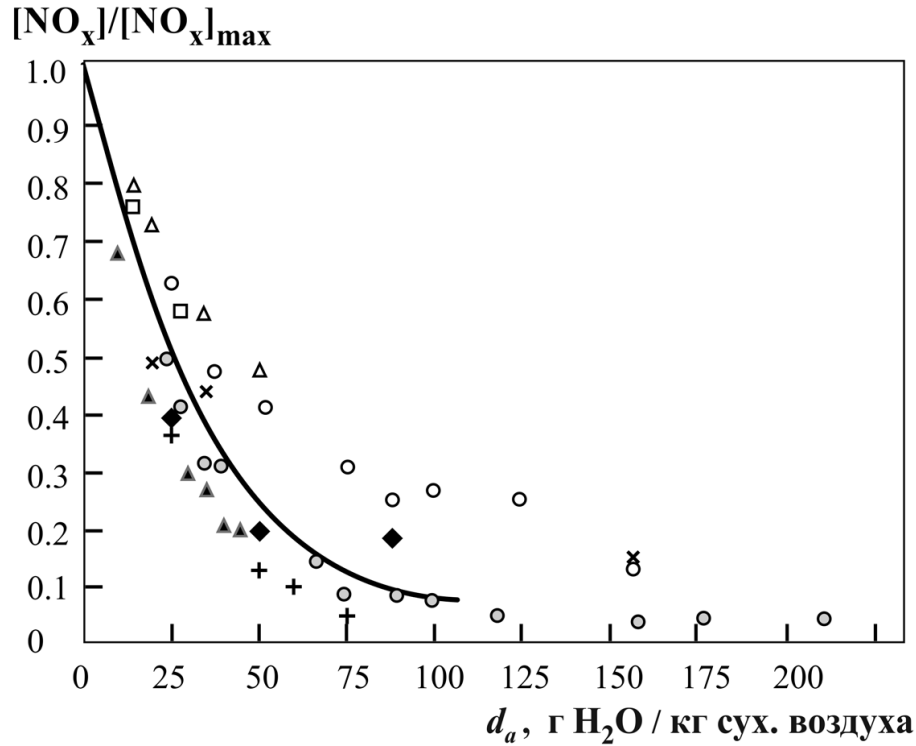


Рис. 3. Зависимость уменьшения относительной концентрации оксидов азота $[NO_x]/[NO_x]_{max}$ в продуктах сгорания смеси природного газа с воздухом от влагосодержания воздуха горения d_a при сжигании топлива в двигателях и камерах сгорания. Маркеры – экспериментальные данные [3], кривая – результат CFD моделирования.

Таблица 1. Состояние насыщения при подготовке воздушного потока, используемого при горении (рис. 5)

Кривая №	d_a , кг H_2O /кг сух. возд.	$T_{a,d}$, К(°С)
1	0 (сух. возд.)	–
2	0.0065	281 (8)
3	0.065	318 (45)
4	0.152	333 (60)
5	0.28	343 (70)
6	0.55	353 (80)

Эффективность использования топлива при влажном горении

В наших исследованиях рассмотрены проблемы, связанные с влиянием увлажнения компонентов исходной смеси: воздуха-окислителя либо технологических газов (доменного, коксового, их смесей, либо их смесей с природным газом) на КПД использования топлива η_f в топочной системе и образование вредных веществ (оксиды азота NO , NO_2 и углерода CO , CO_2).

Основным фактором, определяющим уровень $[NO]$

в продуктах влажного горения, является абсолютное содержание H_2O в продуктах d_a , которое, в свою очередь, зависит от температуры воздуха-окислителя T_a и относительной влажности ϕ_a перед подачей воздуха в топку. Величина воспринятого теплового потока при описанных условиях служит мерой энергетической эффективности КС, определяющей ее КПД:

$$\eta_f = Q_w/Q_f. \tag{1}$$

В связи с понижением температурного уровня продуктов в объеме КС в условиях влажного горения в топках и камерах сгорания КС ослабляется интенсивность тепловых процессов и уменьшается тепловой поток Q_w , воспринятый стенками КС (рис. 1, а).

В результате влажное горение сопровождается понижением КПД топок и КС (использования топлива) η_f , а экологические преимущества для обеспечения промышленной реализации способа должны сочетаться с энергетическим совершенством системы. С целью обеспечения конкурентоспособности влажного горения в последние годы развиваются различные технологии и схемы с использованием специфических методов утилизации теплоты уходящих из топок продуктов сгорания (УТУПС).

Наиболее эффективные современные топочные системы, реализующие процессы влажного горения, используют следующие технологии УТУПС [2, 3, 5]:

- WVP (*water vapor pump* – паровой насос) обеспечивает нагрев и увлажнение воздуха горения через промежуточный водяной теплоноситель с использованием двух контактных теплообменников: «продукты сгорания – вода (пар)» и «вода– воздух горения»;

- термохимическая рекуперация обеспечивает получение высокоэнтальпийного топлива при конверсии природного газа продуктами сгорания и использование теплоты эндотермических реакций (latent heat);

- M-cycle (цикл Майсоценко), используемый в целях охлаждения воздушного потока, который сам себя охлаждает после поворота в условиях противоточного течения и увлажнения. Достоинство M-cycle состоит в достижении охлаждаемым влажным воздухом предельной температуры порядка точки росы t_d , а не температуры мокрого термометра в качестве нижнего потенциала цикла Карно [3, 5]. В конечном счете это обеспечивает повышение температуры и влагосодержания воздуха горения, проходящего через контактный теплообменник утилизатора теплоты M-cycle.

Большое значение для повышения КПД η_f при утилизации теплоты продуктов сгорания имеет уровень температур подогрева воздуха горения. На рис. 4, а, б представлены схемы, где целевое использование топлива в высокотемпературной печи сочетается с глубокой двуступенчатой утилизацией теплоты уходящих газов при сопутствующем увлажнении воздуха (II ступень рекуперации по ходу продуктов сгорания). Это обстоятельство обусловлено тем, что процесс на II ступени – «незначительный подогрев – увлажнение воздуха» – воздействует сразу на два фактора, определяющие абсолютное

влагосодержание d_a воздуха горения: температуру подогрева воздуха и, соответственно, его точку росы (значения температуры $t_d = t_{sat}$ и упругости насыщения p_{sat}), а также на относительную влажность воздуха ϕ_d .

На рис. 4 рассмотрены две теплоутилизационные системы. На каждой из схем: а) и б) – влажный воздух используется в качестве окислителя при сжигании топлива. При этом в обоих случаях I-я ступень представлена высокотемпературным поверхностным (трубчатый) рекуператором УТ1. Вторая ступень в рассматриваемых схемах выполнена по-разному. В случае а), иллюстрирующем систему WVP [3], вторая ступень УТ-2 утилизации теплоты представляет пару контактных теплообменников: «продукты сгорания - промежуточный водяной теплоноситель» и «вода-воздух горения».

В случае б) (M-cycle) утилизация энергии системы выполняется в аппарате Майсоценко и обеспечивается передачей теплоты уходящих продуктов сгорания путем интенсивного охлаждения стенок дымового канала благодаря увлажнению стенок с другой стороны, где размещаются «мокрые ячейки» (WC) аппарата Майсоценко (рис. 4,б). Поступающий в ячейки WC из первичных сухих ячеек DC воздух горения (product air) нагревается, а вода со стен ячеек WC испаряется, что интенсифицирует теплообмен.

В M-cycle реализуется процесс косвенного испарительного охлаждения (indirect evaporation), когда первичный (технологический) воздух (product air) поступает из сухой ячейки по одну сторону пластины и удаляется в виде вторичного влажного воздуха (secondary or working air) по другую сторону пластины [5].

На рис. 5 представлено изменение КПД η_f в условиях УТУПС продуктов сгорания (уходящих газов) на срезе топочной камеры $T_{g,ex}$ при сжигании метана с насыщенным влажным воздухом, варианты состояния которого сведены в таблицу 1.

При оценке расходования топлива в зависимости от состава и характеристик топлива и окислителя используется понятие КПД «идеального» топочного устройства η_f :

$$\eta_f = \frac{I_{f,T} - I_{f,ex}}{\Delta I_{f,T}^*},$$

где числитель и знаменатель относятся к энергетическим характеристикам (полным энтальпиям) топливо-окислительной смеси для 1 кг топлива, причем числитель – располагаемая полная энтальпия фактической (по составу) смеси в диапазоне от T_T до $T_{g,ex}$, а знаме-

натель – теплота сгорания рассматриваемого топлива. В качестве теплоты сгорания принимается избыточная энтальпия эталонных продуктов сгорания, когда окислитель – сухой воздух в стехиометрическом количестве при стандартных условиях ($T_{a,0} = 298 \text{ K}$).

Энтальпии $I_{f,T}; I_{f,ex}$ относятся к увлажненной топливоокислительной смеси в топочной камере при фактически используемых параметрах: $\lambda, T_a, \varphi_a, d_a$ (в данном случае – природного газа).

Из примера, приведенного на рис. 5, следует вывод

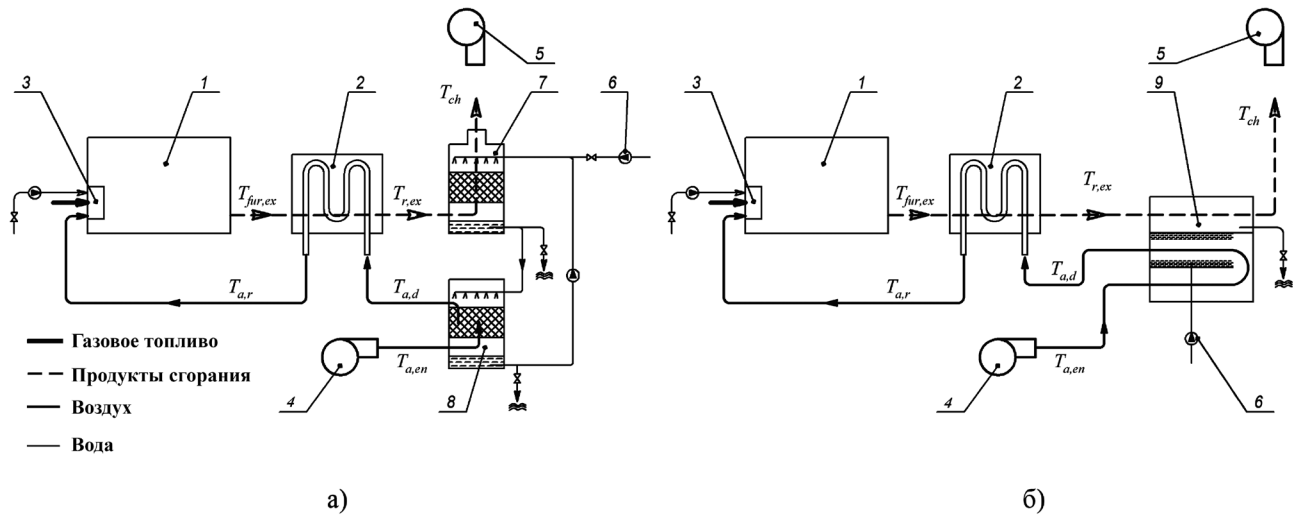


Рис. 4. Схема глубокой утилизации теплоты с увлажнением воздуха горения и его последующим нагревом в рекуператоре: а) – с использованием системы “варог рипр”; б) – с нагревом и увлажнением воздуха в цикле Майсоценко.

- 1 – высокотемпературная печь; 2 – высокотемпературный рекуператор (утилизатор теплоты УТ-1);
 3 – горелочное устройство; 4 – нагнетатель воздуха; 5 – дымосос; 6 – водяной насос;
 7 – контактный водяной экономайзер; 8 – контактный воздухоподогреватель;
 7, 8 – система “варог рипр” (УТ-2 утилизатор 2-й ступени);
 9 – контактный воздухоподогреватель Майсоценко.

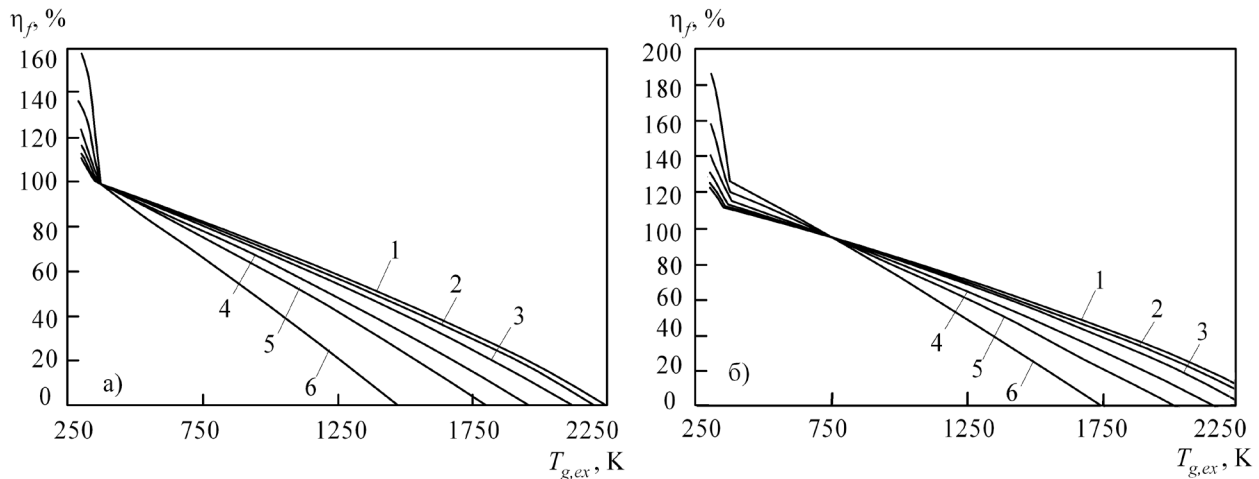


Рис. 5. Зависимость КПД использования топлива η_f от температуры уходящих продуктов сгорания в температурном диапазоне от T_T до $T_{g,ex}$ при стехиометрическом сжигании метана CH_4 с насыщенным увлажненным воздухом, подогретым в 2-ступенчатом рекуператоре до температуры $T_a = 373 \text{ K}$ (а) и $T_a = 800 \text{ K}$ (б). 1-6 – состояние воздушного потока перед горением – см. таблицу.

о возможности существенного повышения эффективности использования топлива при окислителе – насыщенном воздухе, подогретом в 2 – ступенчатом рекуператоре, где 2–я ступень выполнена в виде контактного теплообменника, а уходящие газы охлаждаются до температуры окружающей среды, близкой к стандартной T_0 или ниже ее.

Все расчеты в упомянутом примере выполнены в предположении равновесного состояния продуктов сгорания, включая фазовый состав пароводяной составляющей продуктов в результате частичной конденсации продуктов сгорания до состояния равновесия.

Если при температуре $T_{g,ex} > T_{a,r}$ при сжигании природного газа с насыщенным воздухом повышение $T_{g,ex}$ приводит к понижению η_f по мере увлажнения воздуха горения и повышения $T_{a,d} = T_{a,sat}$ (таблица), то при $T_{g,ex} < T_{a,r}$ КПД η_f возрастает по мере увлажнения воздуха. Такое явление связано с тем, что при $T_a < T_{a,d}$ при низких $T_{g,ex} < T_{a,d}$ часть H_2O в продуктах сгорания присутствует по равновесию в жидкой фазе (вода), то есть теплота конденсации паров используется в качестве полезной энергии.

Выводы

1. Для повышения эффективности использования увлажненных топливоокислительных смесей необходимо обеспечить глубокую утилизацию энергии исходной топливоокислительной смеси, включая энергию атмосферного влажного воздуха, идущего на горение. Эта задача выполняется при трансформации теплоты уходящих газов благодаря вовлечению увеличенной массы пара в поток рабочего тела, использованию возросшей удельной и общей избыточной полной энтальпии “паровой” составляющей продуктов сгорания, а также минимизации температуры уходящих газов, в т.ч. при конденсации водяных паров.

2. Установлена возможность резкого, более чем на порядок сокращения выбросов NO и одновременно примерно 2-кратное снижение концентрации CO при сжигании метано-воздушной смеси в условиях увлажнения воздуха горения до состояния насыщения при температуре 325 К.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Göke S.* Ultra Wet Combustion: An Experimental and Numerical Study (genehmigte Dissertation) Berlin, Technischen Universität Berlin, 2012 D83. 155 p.
2. *Сорока Б.С.* Влажное горение – современное направление экологически чистого сжигания топлива и решения проблемы устойчивого развития энергетики // Международный научный журнал “Альтернативная энергетика и экология”. 2018 – № 25 – 30 (273 – 278) С.96– 117.
3. *Guillet, R.* The Humid Combustion to Protect Environment and to Save the Fuel: the Water Vapor Pump and Maisotsenko Cycles Examples/R. Guillet// International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2011. – Vol. 12, #(2 – 4). – P. 259 – 271.
4. *Wet Combustion – GREENEST.* New Technique of Combustion of Cases.[Электронный ресурс]. <http://fd.tu-berlin.de/en/research/projects/accomplished-dormant/greenest-wet-combustion/>.
5. *Gillann L., Maisotsenko cycle for cooling processes* // Intern. Journal of Energy for a Clean Environment. Vol. 9, Nu.1–3, pp 47– 64, 2008. Printed August 5, 2010. Copyright 2010.
6. *Сорока Б. С., Корнієнко А.В., Кудрявцев В.С., Карабчиевская Р.С.* Сокращение выбросов оксидов азота в открытом факеле природного газа при вводе водяного пара в поток воздуха горения // Энерготехнологии и ресурсосбережение – 2018, №2. С. 57– 70.

**POWER EFFICIENCY OF THE “WET”
COMBUSTION AND POLLUTANTS FORMATION
REDUCTION**

Soroka B., Zgurskyi V.

*The Gas Institute of the National Academy of Sciences of
Ukraine, 39 Degtyarivska St., 03113 Kyiv, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.8>

The role and place of water vapour containing particularly in atmospheric air – by combustion processes have been considered with the purpose of reduction the harmful effluents: of nitrogen oxides and of carbon oxide – in power engineering.

The problem of interconnection the principal characteristics of Earth climate, combustion process and fuel utilization efficiency has been considered. Some solutions concerning wet combustion process have been elaborated.

The results of CFD modeling and of thermodynamic analysis have been summarized and the suitable data have been given based upon numerical calculations of influence the relative humidity of atmospheric air within the range of $\varphi = 0 - 100\%$ on fuel using efficiency and on values of [NO] and [CO] concentration at the exit of combustion chamber.

It has been revealed the sharp change with value reduction of the NO effluents greater than by order while approximately 2-times lowering of [CO] concentration under methane–air mixture burning in conditions of an air preheating and humidification up to saturation state ($\varphi = 100\%$) at 325K.

Coincidence of relative change the NO (NO_x) issue due humidification the combustion air studied by means of CFD prediction and accordingly the tests' data processing have confirmed the qualitative and the quantitative correspondence of physical and chemical kinetics mechanisms, used in frame of CFD modeling procedures, with those taking effect by the real industrial processes.

It has been stated that principal way of enhancement the efficiency of wet combustion system regarding fuel use makes heat recovery of flue gases including the condensation heat of water vapour humidifying the initial fuel and air mixture. The following smart technologies could be related to the up to-date trends accompanying the fuel “wet combustion” process with a humid air: WVP – water pump; thermochemical fuel regeneration; Maisotsenko cycle.

References 6, figures 5, tables 1.

Keywords: air pollutions, combustion kinetic mechanism, efficiency of fuel use, heat recovery, nitrogen oxides, thermodynamic analysis, wet combustion.

1. *Göke S.* Ultra Wet Combustion: An Experimental and Numerical Study (genehmigte Dissertation) Berlin, Technischen Universität Berlin, 2012 D83. 155 p.

2. *Soroka B.S.* [Wet burning – the modern trend in environmental benign fuel combustion and in solution to the problem of sustainable development of the power generation] // *Mezhdunarodnyiy nauchnyiy zhurnal “Alternativnaya energetika i ekologiya”* [International Scientific Journal for “Alternative Energy and Ecology”]. 2018 – № 25 – 30 (273 – 278) C.96–117. (in Rus.)

3. *Guillet, R.* The Humid Combustion to Protect Environment and to Save the Fuel: the Water Vapor Pump and Maisotsenko Cycles Examples/R. Guillet// *International Journal of Energy for a Clean Environment*. – 2011. – Vol. 12, #(2 – 4). – P. 259–271.

4. *Wet Combustion – GREENEST. New Technique of Combustion of Cases.*[Электронный ресурс]. <http://fd.tu-berlin.de/en/research/projects/accomplished-dormant/greenest-wet-combustion>.

5. *Gillann L., Maisotsenko cycle for cooling processes* // *Intern. Journal of Energy for a Clean Environment*. Vol. 9, Nu.1–3, pp 47–64, 2008. Printed August 5, 2010. Copyright 2010.

6. *Soroka B.S., Korniyenko A.V., Kudryavtsev V.S., Karabchiyevskaya R.S.* [Reduction of Nitrogen Oxides Effluents within an Open Flame by Input the Water Vapour into Combustion Air Flow], *Enerhotekhnologii ta enerhozberezhennia* [Energy technologies and resource saving]. 2018, №2. P. 57–70 (in Rus.)

Отримано 10.04.2019

Received 10.04.2019