

Охрана окружающей среды

УДК 543.272.32:665.511:621.1

Сорока Б.С., докт. техн. наук, проф., **Корниенко А.В.**,
Кудрявцев В.С., канд. техн. наук, **Карабчиевская Р.С.**
Институт газа НАН Украины, Киев
ул. Десятаревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: boris.soroka@gmail.com

Сокращение выбросов оксидов азота в открытом факеле природного газа при вводе водяного пара в поток воздуха горения

Представлены результаты экспериментального исследования ввода пара (H_2O) в состав подготовленной газо-воздушной смеси, подаваемой на горение. Изучено влияние пара в смеси на уровень оксидов азота в продуктах сгорания. Описаны методика экспериментальных исследований, конструкция огневой установки и контрольно-измерительная аппаратура, использованная в опытах. Исследованы особенности стабилизации горения, структура свободного вертикального факела в зависимости от состава горючей смеси, а также ее влагосодержания — концентрации H_2O в исходной газо-воздушной смеси. Проведена сравнительная оценка уровня NO_x в открытом факеле в зависимости от температуры и состава исходной смеси природного газа и воздуха (соотношения «воздух : газ»). Доказана возможность двукратного сокращения максимальной концентрации NO_{max} в факеле при обогащении исходной газо-воздушной смеси паром. *Библ. 23, рис.10, табл. 1.*

Ключевые слова: атмосферная горелка, водяной пар, огневой стенд, оксиды азота, природный газ, увлажнение воздуха-окислителя, факел горения, эжекционная горелка с двумя активными струями.

Сжигание топлива при нестехиометрических соотношениях «окислитель : топливо» («воздух : газ») широко используется в установках — бытовых потребителях топлива. Это связано с тем, что для отопления таких потребителей целесообразно использовать энергию газовой струи не только для ввода топлива в горелки, но и для подачи воздуха-окислителя из окружающей атмосферы. Такая возможность обеспечивается трансформацией энергии газового потока внутри горелки с эжекционным смесителем для обеспечения движения обоих компонентов горения [1–3]. Первые

конструкции газовых горелок, упомянутые в американской литературе, были представлены National Bureau of Standards (Национальное бюро стандартов) и развиты A.G.A.Laboratories (Американской газовой ассоциацией) [4].

Чтобы уменьшить требующуюся энергию воздушного потока в эжекционной горелке, рабочий режим должен соответствовать сжиганию «богатой» смеси (коэффициент избытка первичного воздуха должен быть меньше единицы: $\lambda < 1,0$). Следовательно, при этом обратная λ величина Equivalence Ratio $\Phi = \lambda^{-1} > 1,0$.

Соответствующие устройства типа бунзеновских горелок и схемы сжигания представляют интерес также как базовые элементы для изучения общих закономерностей горения и образования вредных веществ.

Одно из возможных направлений использования процесса «влажного горения» («wet combustion») — сжигание топлива в водонагревателях и бытовых котлах, обогреваемых с помощью «атмосферных» горелок.

Атмосферные горелки и обеспечиваемый ими процесс для случая горения подготовленной смеси отличаются от топочного сжигания тем, что для первого из процессов — бытового использования газа — локальный коэффициент избытка воздуха в факеле изменяется непрерывно по мере удаления от горелки и следующим образом отличается от избытка первичного воздуха λ_{init} :

$$\lambda(s + ds) > \lambda(s) > \lambda_{init}, \quad (1)$$

где s — расстояние вдоль линии тока от источника горения для смеси с начальным коэффициентом избытка воздуха-окислителя λ_{init} .

Это обусловлено тем, что обычно для атмосферных горелок справедливо соотношение:

$$\lambda_{amb}(s) = idem = \infty, \quad (2)$$

где λ_{amb} соответствует воздуху, окружающему факел.

Если процесс горения осуществляется в ограниченной стенками топочной камере, оснащенной горелкой предварительного смешения, то локальный коэффициент избытка воздуха вне и внутри факела во всем объеме камеры неизменный и соответствует исходному коэффициенту избытка воздуха, подаваемого в горелку:

$$\lambda(s + ds) = \lambda(s) = \lambda_{init}. \quad (3)$$

Одной из наиболее обоснованных технических причин, обуславливающих справедливость уравнения (3), является рециркуляция потока горящего факела на периферии (индекс «amb») топочной камеры. Как правило, рециркулирующие продукты сгорания служат надежным источником прикорневого зажигания и стабилизации факела.

В фундаментальной монографии [5] приведена такая классификация типов пламени: по геометрии потока и фронта горения — плоские и осесимметричные; по гидродинамике — ламинарные и турбулентные; по способу смесеобразования — сжигание подготовленных смесей и

предварительно не перемешанных исходных компонентов, организация смесей с частичной подготовкой (первичные смеси).

Для атмосферных горелок бытового назначения характерно, что $\lambda_{init} < 1,0$, и процесс горения смеси газа с воздухом исходного состава сопровождается диффузионным дожиганием продуктов неполного сгорания за фронтом первичного горения [5]. Соответствующий процесс описывается уравнениями (1) и (2). Имеются указания о чрезвычайной распространенности описываемых устройств: до 30 % всего природного газа сжигается при организации описанных видов пламени [5], которые авторы именуют «смешанное ламинарное пламя с предварительно перемешанной и не перемешанной смесью».

Сжигание газового топлива в условиях ввода H_2O в камеру сгорания как дополнительного агента. Современное состояние проблемы

В последние годы расширяется использование некоторых направлений сжигания топлива с увлажненным окислителем, в частности, в связи с углубленной утилизацией теплоты уходящих газов. Процесс «humid combustion», или «wet combustion» (сжигания топлива с добавлением воды или водяного пара), привлекает значительное внимание ввиду ожидаемых экологических преимуществ, а при утилизации скрытой теплоты парообразования — с целью использования высшей теплоты сгорания топлива, следовательно, теплоты конденсации, в том числе при различных температурах [6]. Для этого в некоторых случаях утилизация теплоты уходящих продуктов сгорания обеспечивается в аппаратах «vapor pump» (WVP) [7–9]. В устройствах WVP рабочий процесс обеспечивается, как правило, за счет предварительного подогрева компонентов горения, прежде всего воздуха горения, при одновременном увлажнении воздуха.

1. В Институте газа НАН Украины впервые в Украине были инициированы систематические расчетно-теоретические исследования горения природного газа с увлажненным воздухом-окислителем. В последние годы эти работы дополнены испытаниями на огневом экспериментальном стенде. Исследования экологических аспектов горения природного газа при увлажнении потока окислителя в термодинамической постановке впервые в СССР были проведены в начале 1990-х гг. проф. Сорокой Б.С. [10].

Наши исследования [11], выполненные с использованием процедур CFD-моделирования и с привлечением развернутых механизмов горения, в частности, DRM 19 на 19 реагирующих компо-

нент (без N_2 , Ar, NO, NO_2), и свыше 80 химических реакций показали возможность существенного сокращения выбросов NO_x и одновременно в определенной степени понижения концентрации [CO] при сжигании подготовленной смеси метана с увлажненным воздухом в условиях топочной камеры при сопутствующей периферийной рециркуляции продуктов сгорания.

2. Изменение требуемого расхода топлива при увлажнении воздуха-окислителя обусловлено понижением КПД использования топлива η_f топочной камеры вследствие уменьшения теоретической температуры горения T_T : в соответствии с КПД цикла Карно значение η_f тем меньше, чем ниже верхний потенциал процесса и чем больше нижний потенциал — температура газов, уходящих из топки.

В связи с отрицательным влиянием ввода пара на КПД топочной системы [11] предложены различные комбинированные схемы использования топлива при его сжигании с влажным воздухом, обеспечивающие возможность повышения суммарного КПД технологической схемы в целом, а сопутствующее сокращение расхода топлива сочетается с экологическими преимуществами, характерными для процессов «wet combustion». Основу этих методов составляет сочетание различных процессов с целью повышения потенциала теплоносителя (теплоносителей) в том же или в другом процессе предлагаемой технологии.

В числе упомянутых схем следует указать разработки, связанные с использованием топлива в газовых турбинах при сжигании различных горючих с воздухом, обогащенным водяным паром. Имеются данные о том, что практически любые топлива — от природного газа до биогаза и газов, содержащих водород, — могут быть использованы с обеспечением повышения энергетического КПД [12]. При этом была доказана возможность сжигания топлива с добавкой пара или воды без гашения пламени, однако при значительном сокращении вредных (прежде всего NO_x) выбросов.

Более того, для реализации процесса низкоэмиссионного сжигания рекомендован сверхвлажный газотурбинный цикл, имеющий большую эффективность, чем «сухой» газотурбинный цикл [13]. При этом имеются указания на эффективное подавление образования NO_x при использовании в качестве топлива для газовых турбин газов, обогащенных H_2 , и даже чистого водорода. Экспериментальные исследования проводились на предварительно перемешанных смесях.

Существенное повышение КПД газовых турбин с «влажным» циклом с достижением та-

кой эффективности, как для установок с комбинированным циклом (до 55–60 %), установлено в работах Jonsson and Yan (2005), Pratt & Whitney (2002), однако при существенном уменьшении стоимости установки, с выявлением возможности регулирования нагрузки и сокращения вредных выбросов [13].

На возможность использования данных по сжиганию газа в атмосферных горелках предварительного смешения типа бунзеновской с целью анализа работы камер сгорания газотурбинных двигателей, работающих при давлении 15–30 атм, указывалось, в частности, в работе [14], поскольку влияние давления p на скорость турбулентного горения u_t отсутствует: $u_t \sim p^0$.

Фактор давления в большой степени определяет преимущественный механизм образования NO_x : «prompt» — при давлении 1 атм, «postflame» — при давлениях до 30 атм [14]. Поскольку действие каждого из механизмов преимущественно связано с уровнем избытка воздуха, большую роль наряду с λ играет родственный фактор — «степень перемешанности газо-воздушного потока» [14].

3. Работы европейских центров сильно продвинули возможности технологии «wet combustion». Это прежде всего относится к участию Берлинского технического университета (Hermann-Fottinger-Institute, Technische Universität, Berlin, Germany) [15] в теоретических и экспериментальных исследованиях в области технологий влажного и сверхвлажного горения.

В связи с ухудшением устойчивости горения при наличии в воздухе водяного пара обычно доля последнего в камерах сгорания газовых турбин составляет не более 10 % общей массы воздуха [12].

Традиционные исследования увлажнения потоков в газовых турбинах относились к «wet-combustion» при содержании пара D_{WV} до 15 %, причем эта ситуация особенно касалась топлив, обогащенных H_2 . Значимость этого фактора обусловлена высокой реакционной способностью H_2 -содержащих топлив, сильно падающей после обогащения паром, что приводит к отрыву пламени горючих смесей при вводе пара.

В работе [16] приведены результаты исследований системы «ultra-wet» combustion в широком диапазоне избытков топлива (Equivalence Ratio $\Phi = ER = \lambda^{-1}$) — от околостехиометрических смесей вплоть до случаев содержания пара или N_2 в диапазоне $D_{H_2O} = \Omega \in \{0; 30\}$ %, когда наступает «бедный срыв» (при значительном избытке воздуха). Здесь Ω — массовая доля пара в воздухе горения, $\Omega = \Omega_{a,m} = \dot{m}_{WV} / \dot{m}_a$.

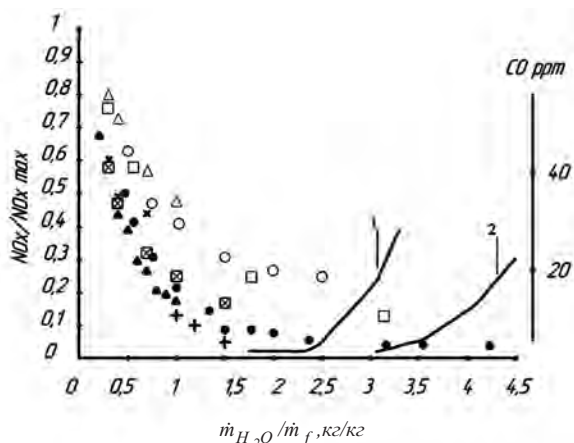


Рис.1. Зависимость относительного сокращения выбросов оксидов азота $NO_x/NO_{x\max}$ и концентрации оксидов углерода $[CO]$ от соотношения массовых потоков влаги и топлива $\dot{m}_{H_2O}/\dot{m}_f, \text{кг}/\text{кг}$ (степени увлажнения потока горючей смеси). Рост $[CO]$ определяет зону риска (восходящие кривые CO): 1 — для газовых турбин; 2 — для аппаратов WVP — «паровой насос».

Накоплены результаты экспериментальных исследований влияния влаги на выбросы NO_x и CO по результатам опытов, которые проводились при сжигании природного газа, в условиях варьирования потоков и поддержания соотношения «вода : топливо» в диапазоне $\dot{m}_{H_2O}/\dot{m}_f \in \{0; 4,25 \text{ кг}/\text{кг}\}$ (рис.1).

Диапазон изменения характеристик горючего газа и воздуха при проведении исследований сжигания разбавленных, в том числе увлажненных, горючих смесей варьировался в зависимости от отдельных целей работы (таблица). В качестве горючего использовался природный газ (NG), водород H_2 , в качестве окислителя — воздух от сухого холодного до разбавленного подогретого. В качестве разбавителя использовался пар или N_2 , причем диапазоны разбавления в обоих случаях были одинаковые: в [16] указывается, что запись $\Omega' = \Omega'_{N_2}$ означает равные объемные доли разбавителей воздуха (пара или N_2).

В результате соответствующих экспериментальных работ установлено монотонное асимптотическое снижение содержания $[NO_x]$ по мере увлажнения реагирующей смеси (по нашим

Условия проведения опытов при замерах выбросов [16]

Топливо	Разбавитель	Ω'	T_{in}, K
NG, H_2	—	0	293, 473, 623
NG, H_2	H_2O	0,1; 0,2; 0,3	473, 623
NG, H_2	N_2	0,1; 0,2	623

оценкам литературных данных, до 20 раз при соотношениях «вода : топливо» $\approx 1,5-2,5$ [7]). Этот результат полностью соответствует данным проведенного нами CFD моделирования горения природного газа с воздухом, обогащенным паром, в прямоточной камере при варьировании абсолютной влажности воздушного потока, то есть в зависимости от относительной влажности при фиксированной температуре подогретого воздуха [11].

Исследования европейских (Германия, Швеция и др.) и американских ученых и инженеров проводились с использованием всевозможных способов изучения влажного горения при расчетном подходе (CFD моделирование) и путем экспериментальных исследований (огневых испытаний) в условиях сжигания топлива с помощью двух типов горелок: вихревой (с круткой потока) и конструкции «ламинарной» щелевой горелки. В последнем случае выполнялась прямая оценка влияния водяного пара на процесс горения и скорость ламинарного горения.

Газовые турбины с увлажнением, работающие при ультравлажных условиях, обеспечивают значительное увеличение КПД по сравнению с сухим газотурбинным циклом [16]. Ультравлажные газовые турбины при эксплуатации достигают КПД, сопоставимого с современными энергетическими установками, работающими на комбинированном цикле, — вплоть до 55–60 %, но при существенно меньших стоимости установки (капитальные затраты) и уровне вредных выбросов [13, 16].

Кроме того, высокое паросодержание обеспечивает low- NO_x околостехиометрическое сжигание, организуя работу камеры сгорания с максимальным уровнем CO_2 для очистки турбины после конденсации пара, а также послегорелочного сбора углекислоты за системой сжигания топлива. Реакционная способность H_2 сильно падает при впрыске пара, когда обеспечивается «чистая» (с низкими вредными выбросами) и энергетически эффективная эксплуатация КС ГТУ при работе с богатыми водородсодержащими топливами — от биомассы и продуктов газификации угля до чистого H_2 [13].

Процессы «влажного горения» («wet combustion»), обеспечиваемые добавлением водяного пара при горении, а также сопутствующими способами утилизации теплоты уходящих газов позволяют одновременно значительно экономить топливо и минимизировать вредные выбросы в атмосферу. Тем самым обеспечивается перспективное современное направление экономики — устойчивое развитие энергетики (sustainable use) [18].

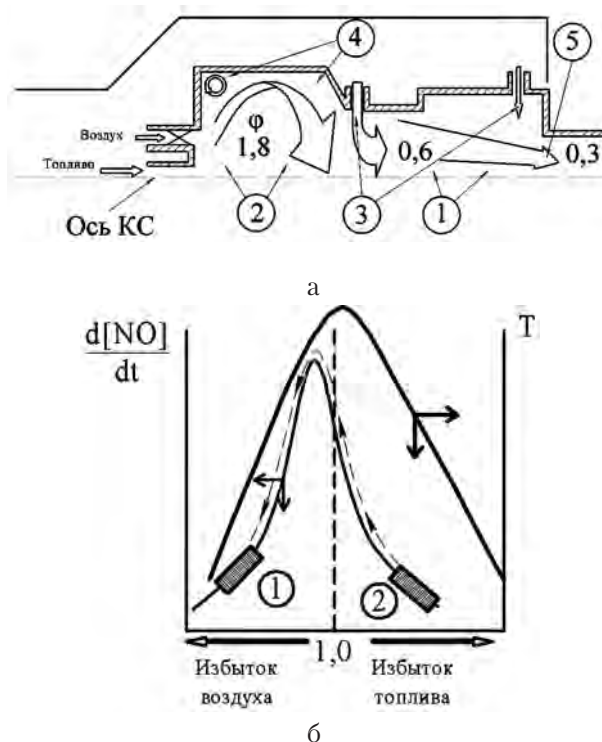


Рис.2. Распределение потоков и характеристики горения в камере сгорания RQL ГТУ: а – динамика сжигания топлива и перемешивания потоков в объеме камеры сгорания; б – зависимость температур горения T и скорости образования NO от коэффициента избытка воздуха λ [19]: 1 – область обедненного горения; 2 – область обогащенного горения; 3 – воздушные струи на скоростное смешение и разбавление; 4 – области застойных течений; 5 – разбавленные уходящие газы.

4. В стационарных установках распространены системы сжигания обедненных предварительно перемешанных смесей в случае пониженных требований безопасности, фиксированного режима работы и благодаря возможности низкоэмиссионного сжигания (по NO_x). Альтернативу этому методу сжигания топлив представляет технология RQL, развитая в 1980-х гг. [13, 19, 20].

Сверхвлажный «ultra-wet» газотурбинный цикл реализуется при работе газовых турбин на топливах, обогащенных H_2 и даже на чистом водороде [13]. «Ultra-wet» процесс исследовался численно и экспериментально применительно к разным видам ламинарного пламени предварительно подготовленной метано-воздушной смеси. В дальнейшем этот процесс исследовался в условиях сжигания при стабилизации пламени за счет крутки потока, а также в RQL-камере сгорания.

Газотурбинные двигатели, в частности, авиационные являются еще одной перспективной областью практического применения сжигания топлива с добавлением водяного пара. При сжигании газообразного топлива в этих устройствах

используется принцип RQL [13], реализующий способ двухстадийного или многостадийного сжигания топлива. На первом этапе процесса происходит сжигание «богатой» смеси (коэффициент избытка воздуха $\lambda = 0,56$, избытка топлива (Equivalence Ratio ER) $\Phi = \lambda^{-1} = 1,8$), на последних этапах – дожигание и разбавление продуктов первичного горения (рис.2).

Этот принцип подробно описан в зарубежной и русскоязычной литературе [19, 20]. Примечательно, что значения коэффициента избытка первичного воздуха в процессе RQL-сжигания сопоставимы с пределами работы по коэффициенту избытка воздуха для инжекционной горелки (0,6–1,2), которая использовалась в нашей настоящей работе. Иными словами, результаты данной статьи могут быть использованы при модернизации авиационных двигателей с целью улучшения их экологических характеристик – снижения выбросов NO_x .

На рис.2,б представлены доводы авторов работ [19, 20], пытающихся обосновать сокращение образования оксидов азота в камере сгорания RQL сжиганием газа в областях обогащенных (R – rich) и обедненных (L – lean) топливоокислительных смесей, вне областей, близких к стехиометрическим горючим смесям. Указанные соображения не являются строгими и должны оцениваться критично.

Для сравнения с рис.2,б, имеющим качественный характер, и подтверждения адекватности использованных подходов на рис.3 представлены наши расчетные зависимости теоретических температур горения метана с холодным воздухом и термодинамически равновесных концентраций NO при этих температурах от соотношений воздух : топливо (от избытков воздуха λ и топлива (Equivalence Ratio) $\Phi = \lambda^{-1}$), то есть зависимости $T_T(\lambda)$ и $[NO]_{eq}(\lambda)$.

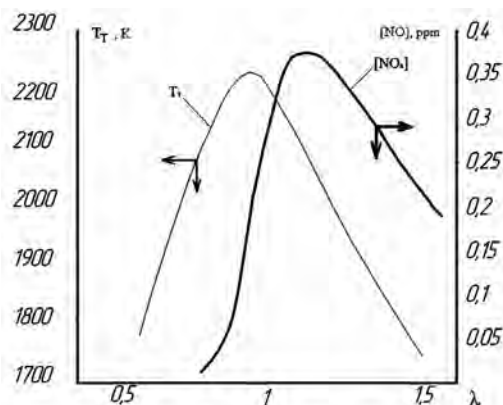


Рис.3. Зависимость теоретической температуры горения метана T_T и равновесного содержания NO $[NO]_{eq}$ в продуктах сгорания при T_T от коэффициента избытка воздуха λ .

Фиксированные значения нормальной скорости распространения пламени, как и теоретические температуры горения T_T , а также равновесные концентрации NO и NO_2 относятся к случаю горения подготовленных смесей в ограниченных каналах, когда избыток окислителя в реагирующей смеси до и за фронтом пламени являются неизменными: $\lambda = \lambda_{\text{init}} = \text{const}$. Поэтому использование характера зависимости $T(\lambda)$, представленной на рис.2,б, и соответственно зависимости $([\text{NO}]/(T(\lambda)))$ строго не являются обоснованными для объяснения сокращения образования NO_x в камере сгорания ГТУ со схемой RQL. В последнем случае (рис.2,а) ссылка на характер процессов при сжигании подготовленной смеси как таковой является условной, ибо не соответствует объекту: для камер сгорания ГТУ значения λ переменны по радиусу камеры (КС) и по ее длине: $\lambda = \text{var}$. Процесс в зонах, где протекает первая стадия сжигания газа — горение газа с недостатком воздуха, сопровождается по длине КС диффузионным дожиганием. Тем не менее, можно согласиться с выводами о предпочтительности системы RQL для КС ГТУ, учитывая возможности снижения выбросов NO_x при неадиабатическом стадийном сжигании топлива [13].

Если для локальных коэффициентов избытка воздуха λ_{loc} справедливо усреднение

$$F_{\text{CC}}^{-1}(l) \int_{F_{\text{CC}}(l)} \lambda_{\text{loc}}(r, l) dF_{\text{CC}}(l) = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}(l) \Omega_{\text{st}}^{-1},$$

(где r, l — соответственно радиальная и продольная оординаты элементарного поперечного участка dF_{CC} камеры сгорания; \dot{m}_a, \dot{m}_f — массовые потоки воздуха и топлива в текущем сечении; Ω_{st} — массовое стехиометрическое число), то для скорости образования оксида азота $\partial[\text{NO}]/\partial t$ подобное усреднение несправедливо в силу значительной нелинейности функции $\{\partial[\text{NO}]/\partial t\}(\lambda)$.

Была предложена концепция камеры сгорания RQL MEGATECH с целью реализации стратегии низкоэмиссионного по NO_x сжигания топлива. Принцип состоит в комбинировании схем Rich-Burn, Quick-Mix, Lean-Burn: сжигание богатой смеси ($\lambda < 1,0$), ввод и скоростное смешение с продуктами «богатого» горения потока (потоков) вторичного воздуха. Разбавление продуктов неполного горения сопровождается их диффузионным дожиганием и постепенным увеличением избытка воздуха до высоких значений ($\lambda_{\Sigma} \geq 3,0$).

Методология и экспериментальная установка для исследования факельных процессов с увлажнением воздуха горения

В Институте газа НАН Украины сооружена экспериментальная установка по исследованию влияния влажности воздуха-окислителя на выход NO_x в факеле природного газа, горящем на открытом воздухе (рис.4).



Рис.4. Внешний вид экспериментальной установки исследования влияния влаги на процесс сжигания природного газа в открытом факеле.

Сжигание подготовленной смеси производится в атмосферном вертикальном факеле, обращенном кверху. Огневой стенд включает узлы генерирования и подачи пара и подогретого воздуха, потоки которых смешиваются в специальном горелочном устройстве со струей горючего газа. Кроме того, в процессе смешения участвуют потоки воздуха-окислителя: сжатый воздух от компрессора (активная струя) и эжектируемый поток, подсосываемый внутрь горелки из атмосферы.

Для исследований использовалось следующее оборудование и измерительная аппаратура (соответствующие позиции представлены на рис.5): **1** — горелка инжекционная разработки Института газа НАН Украины с двумя активными струями, оснащенная стабилизатором горения; **2** — парогенератор Elenberg (Китай). Для регулирования уровня влажности смеси к парогенератору подключен трансформатор типа РНО 250–2 (СССР); **3** — ротаметр типа РМ–6,3 ГУЗ (СССР), используемый в качестве расходомера для потока газа после предварительной тарировки на воздухе. Тарировка ротаметра проводилась в ГП «Укрметртест-стандарт». (Перерасчет расхода на природный газ производился по зависимости:

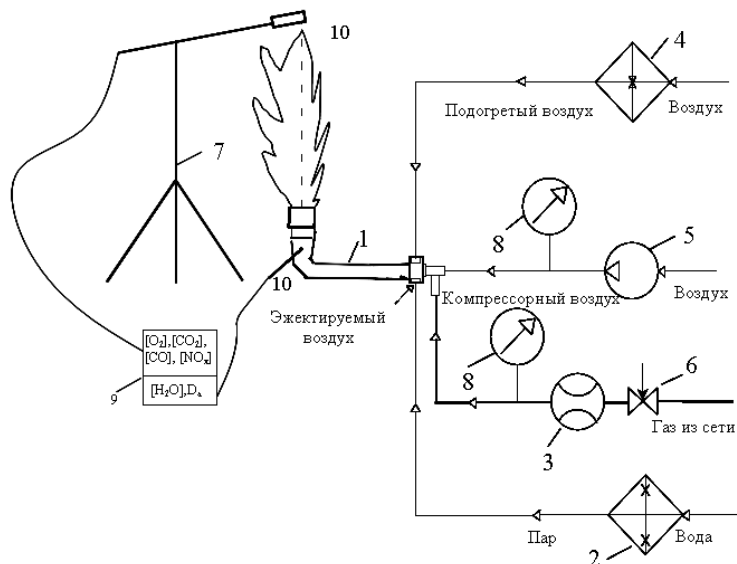


Рис.5. Принципиальная схема экспериментальной установки.

$$\dot{V}_g = \dot{V}_a (M_a / M_g)^{1/2},$$

где \dot{V}_g, \dot{V}_a — объемные расходы топлива и воздуха; M_g, M_a — молекулярные массы топлива и воздуха); **4** — подогреватель воздуха — теплоventильатор ETA 1617 1500 Вт (Словакия); **5** — компрессор FIAS Mecafex B2800/100 CM 2 (Италия); **6** — кран точной регулировки объемного расхода газа, подаваемого на горение; **7** — штатив, позволяющий регулировать положение точки отбора пробы в трех плоскостях; **8** — манометр KromSchroder DMG S2500 (Германия); **9** — прибор портативной системы анализа дымовых газов Testo 350 XL (Германия), оснащенный ячейками газоанализатора — модулями измерения O_2 , CO, NO, NO_2 , SO_2 и стандартным зондом измерения влажности смеси, подаваемой на горение, что позволяет проводить с его помо-

щью комплексные измерения параметров газообразной среды.

Концентрация O_2 одновременно с температурой и относительной влажностью потока определяет характеристику потока горючей смеси, которая фиксируется датчиками O_2 и влажности газоанализатора Testo. Чувствительный элемент пробоотборника 10 устанавливается на оси горелки вблизи от выпускного среза горелочного устройства.

На рис.6 представлены фотографии размещения пробоотборного устройства и измерительных зондов в исследуемом факеле в различных ракурсах.

Горелочное устройство

Основным элементом установки является горелка предварительного смешения с проточной частью типа трубы Вентури. Горелка по принципу действия инжекционная, с двумя активными струями: газовой и компрессорного воздуха, со сверхкритическими параметрами воздуха на входе в горелку. Для подачи активных струй горелка снабжена соответствующими коаксиально расположенными соплами. Кроме этого, обеспечивается принудительная подача подогретого воздуха и водяного пара на вход смесителя горелки, тем самым в смесителе горелки осуществляется перемешивание пяти потоков: двух активных независимых струй (газовой и компрессорной воздушной), подаваемых вдоль оси горелки через упомянутые сопла горелки, а также трех внешних потоков: эжектируемого воздуха из окружающей атмосферы; принудительно подаваемого воздуха от теплоventильатора; водяного пара от парогенератора, — связанных с движением активных струй.

Фиксированные относительные потоки компонент: горячего воздуха и пара — при изначально задаваемых избыточных давлениях активных потоков Δp_g и Δp_a определяют содержание $[O_2]$ в газо-паро-воздушной смеси.

Принцип действия горелки. При экспериментальных исследованиях использовалась упомянутая ин-



Рис.6. Установка пробоотборного устройства и зондирование открытого факела.

жекционная горелка частичного предварительного смешения с угловым смесителем. Внутри смесителя горелки подсасывалось примерно 70 % воздуха, необходимого для полного сгорания газа. Сжигание проводилось в вертикальном атмосферном факеле.

Горелочное устройство обеспечивает стабилизацию основного факела диаметром $D_f = 30$ мм (диаметр выходного сечения указанного смесителя).

Стабилизатор горения — система из 20 низкоскоростных факелков пламени диаметром $D_s = 5$ мм каждый того же состава, что основной факел. Благодаря этому расширяется область устойчивого сжигания по нагрузке: расходу топлива, а также потоку газозвушной и газопарозвушной смеси, по числу Рейнольдса и коэффициенту избытка воздуха. Оси стабилизирующих факелков расположены на цилиндрической поверхности, ось которой совпадает с осью горелки и самого стабилизатора. В результате удается проводить исследования и бунзеновского пламени (богатые смеси, сжигаемые в первичном конусе и догорающие в диффузионном пламени с окружающим воздухом), и факелов полностью подготовленных стехиометрических и даже обедненных горючих смесей ($\lambda \geq 1,0$).

Варьирование параметров и определяющих характеристик работы горелки

В наших работах [21, 22] указывалось, что варьирование температуры воздушного потока сильно сказывается на его влажосодержании в связи с резким изменением упругости насыщения водяного пара по мере роста температуры атмосферного воздуха. В наших опытах усредненный состав природного газа, получаемого из магистрали, принимался постоянным, что дает возможность варьировать уровень влажности газозвушной смеси добавлением водяного пара в воздушный поток, подаваемый на горение. Кроме того, становится возможным отдельно учесть влияние температуры подогрева газозвушной смеси как таковой для случаев, не сопровождаемых влиянием изменения влажосодержания атмосферного воздуха.

Контрольно-измерительная аппаратура на установке позволяет оценить и обеспечить неизменный уровень абсолютного влажосодержания d_a для холодной смеси природного газа с воздухом и для подогретой. При соответствующем сопоставлении исключается оценка влияния степени увлажнения атмосферного воздуха на уро-

вень выбросов $[\text{NO}]$ и $[\text{NO}_x]$, а остается лишь воздействие температурного фактора.

Результаты экспериментальных исследований для ряда значений коэффициента избытка воздуха $\lambda = 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,05; 1,1$ позволяют утверждать, что для подогретой сухой газозвушной смеси уровень $[\text{NO}]$ выше, чем для холодной при прочих одинаковых условиях.

Обсуждение результатов

Стабилизация горения. При исследованиях горения околостехиометрической смеси ($\lambda \approx 1,05$) использовался сетевой природный газ следующего среднего состава, поставляемого ПАО «Київгаз», % (об.): $[\text{CH}_4] = 90,05$; $[\text{C}_2\text{H}_6] = 4,94$; $[\text{C}_3\text{H}_8] = 1,08$; $[\text{C}_4\text{H}_{10}] = 0,29$; $[\text{C}_5\text{H}_{12}] = 0,09$; $[\text{C}_6\text{H}_{14}] = 0,1$; $[\text{N}_2] = 1,6$; $[\text{CO}_2] = 1,87$; $[\text{O}_2] = 0,003$.

В опытах с богатой смесью ($\lambda \approx 0,7$) использовался природный газ следующего среднего состава, % (об.): $[\text{CH}_4] = 90,17$; $[\text{C}_2\text{H}_6] = 4,87$; $[\text{C}_3\text{H}_8] = 1,04$; $[\text{C}_4\text{H}_{10}] = 0,3$; $[\text{C}_5\text{H}_{12}] = 0,09$; $[\text{C}_6\text{H}_{14}] = 0,1$; $[\text{N}_2] = 1,57$; $[\text{CO}_2] = 1,85$; $[\text{O}_2] = 0,002$.

Структура факела. Для расширения пределов устойчивой работы горелка снабжена стабилизатором горения. Изучались пределы устойчивой работы горелки в условиях открытого воздуха практически неограниченного объема (рис.7). В дальнейшем перспективным является проведение таких исследований на природном газе и биогазе разного состава, а также



Рис.7. Факел при $\lambda = 0,7$ и содержании кислорода в смеси $[\text{O}_2] = 18,28$ %.

их смесях, что позволит выявить особенности влияния состава газа на устойчивость работы горелок [2].

При обобщении данных рассматривались закономерности горения для случаев фиксированных расходов топлива \dot{V}_{ng} , коэффициентов избытка воздуха-окислителя λ и температуры газопаровоздушной смеси t_{in} перед выходом из горелки. Благодаря принятой технике измерения концентраций компонент с использованием аппаратуры Testo пар в анализируемой пробе конденсируется, определяются объемные доли компонент в условно сухой (без влаги) газо-воздушной смеси. По этой причине фиксированное значение $[O_2]$ однозначно соответствует величине λ .

В процессе работы горелки на природном газе отмечается принципиально различная структура факела при изменении избытка воздуха. В случае богатой горючей смеси ($\lambda < 1,0$; $\Phi > 1,0$) срыв (отрыв) горения не отмечается, а основной, центральный, факел диаметром $D_f = 30$ мм стабилизирован у среза горелки. На начальном участке факела фиксируется потенциальное ядро в виде конуса, где горение отсут-

ствует, а газовая смесь имеет состав, совпадающий с исходным составом горючей смеси. Здесь содержание $[O_2]$ равно содержанию $[O_2]_{in}$ в исходной горючей смеси. За пределами этого участка по высоте h вдоль оси происходит выгорание факела по мере удаления от среза горелки и роста h , а также наблюдается экстремальное изменение концентрации $[O_2]$ при нарастании содержания кислорода после достижения $[O_2]_{min}$ (рис.8).

Длина факела богатой смеси превышает длину факела смеси оклостехиометрического состава (рис.8). При рассмотрении факела богатой смеси ($\lambda \approx 0,7$) отчетливо различимы основные элементы его структуры: холодный конус, фронт пламени, зона обратных токов, область повышенной светимости вблизи среза горелки.

В случае смеси, по составу близкой к стехиометрической, скорости отрыва пламени W_{b-o} понижаются по сравнению с таковыми для богатых смесей, подтверждая закономерности, представленные в исследовании [2]. В этой связи при $\lambda \approx 1,05$ наблюдается повисание и основного, и стабилизирующих факелков на расстоянии $h_l \approx 0,5 D_f$ от среза горелки.

Добавление влаги в исходную газо-воздушную смесь определенным образом влияет на стабилизацию факела при сжигании подготовленных смесей любого состава. В случае бедной смеси, когда сжигание сухой смеси сопровождается повисанием факела, добавление влаги в исходную газо-воздушную смесь приводит к увеличению высоты повисания h_l факела. Для существенно обедненных смесей ($\lambda \geq 1,2$) добавление пара в газо-воздушную смесь приводит к отрыву факела.

При подаче пара в газо-воздушную смесь в условиях сохранения параметров инжектирующих агентов: горючего газа и компрессорного воздуха перед соответствующими соплами — наблюдается отрыв основного факела и повисание стабилизирующих факелков над срезом горелки. Это связано с понижением скорости горения смеси, обусловленным двумя причинами: понижением коэффициента избытка воздуха λ «богатой» смеси ($\lambda < 1,0$), подготавливаемой в инжекционном смесителе, и собственно вводом пара в горючую смесь и ее балластировкой. Каждая из этих причин понижает нормальную скорость распространения пламени u_n , что приводит к снижению устойчивости факела по отношению к отрыву.

«Повисшее» пламя имеет у своего основания зону аэрации, что обеспечивает подвод к фронту горения дополнительного воздуха, увеличение λ и, следовательно, возрастание u_n . На

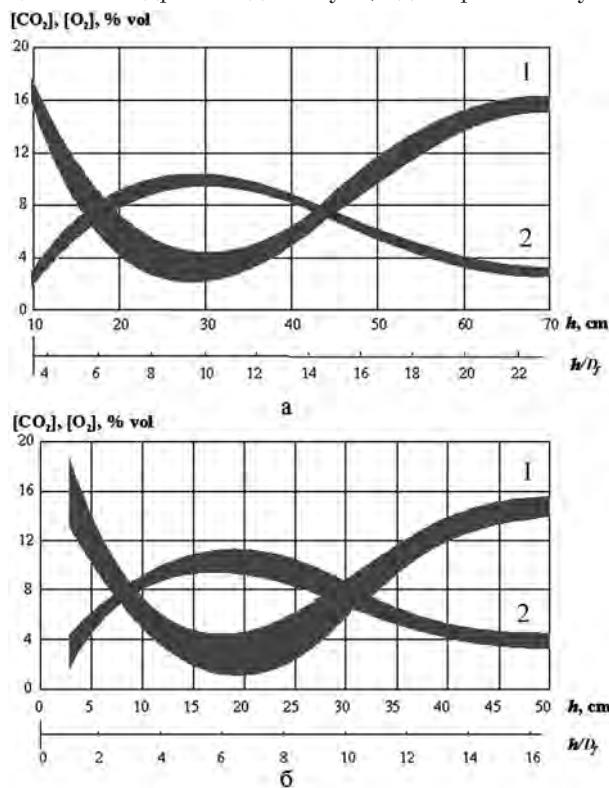


Рис.8. Ход выгорания факела вдоль его оси в зависимости от расстояния от среза горелки при влажосодержании исходной газо-воздушной смеси 5–66 г/м³ (концентрация компонент : 1 — $[O_2]$; 2 — $[CO_2]$) : а) $\lambda = 0,7$; $\dot{V}_{ng} = 4$ м³/ч; $t_{in} = 35-40$ °С; б) $\lambda = 1,05$; $\dot{V}_{ng} = 4-4,5$ м³/ч; $t_{in} = 30-40$ °С.

фронте горения наблюдается равенство локальных скоростей смеси и горения, при ламинарном режиме — скорости u_n , что организует стабилизацию факелков на некотором удалении h от среза горелки.

Проведенные нами расчетные исследования и сопоставления показали возрастание времени задержки воспламенения (ADT) по мере повышения влажности горючих смесей [23]. Рост ADT свидетельствует о понижении вероятности воспламенения горючих смесей по мере их увлажнения, а также указывает на снижение стабилизирующей способности факела.

В работе [16] имеются указания об изменении формы V-образного факела при разбавлении смеси влагой и сжигании природного газа в условиях закрученного потока.

Экспериментально установлено расширение реакционной зоны и передвижение максимума излучения ОН далее, вниз по потоку с удалением от оси факела вследствие понижения скорости горения в условиях влажного горения. Более того, указывается, что дальнейшее после $\Omega = 30\%$ горение возможно только в случае, если температура на входе в камеру сгорания будет повышена. В случае пламени H_2 влияние разбавления паром менее выражено и допускает Ω до 50% [16].

В обоих случаях устойчивого горения: при полной стабилизации у среза горелки, а тем более в случае повисшего факела — в средней части факела достигается температурный максимум.

Отмечается экстремальный характер изменения в атмосфере концентраций компонент продуктов сгорания свободного вертикального факела: с минимумом — по O_2 (компонент исходной смеси и продуктов сгорания в условиях их разбавления в атмосфере); с максимумом — по CO_2 (компонент продуктов сгорания, образуемый в факеле и постепенно разбавляемый в воздушной атмосфере). По этой же причине содержание NO_x вдоль оси факела также проходит через максимум: $[NO_x]_{max} \approx [NO]_{max}$.

Образование NO_x при горении и влияние ввода водяного пара

Оксиды азота с концентрациями $[NO_x] = [NO] + [NO_2]$ в рассматриваемом факеле представлены практически целиком NO: $[NO_x] \approx [NO]$; $[NO_2] \rightarrow 0$. Значения $[NO_x]_{max}$ в факеле при прочих равных условиях (тепловая мощность, содержание H_2O) возрастают при увеличении коэффициента избытка воздуха от $\lambda \approx 0,7$ до $\lambda \approx 1,05$. Установлено при измерениях в

описываемых опытах, что в пределах факела вдоль его оси концентрация $[NO]$ проходит через максимум при любом режиме и для богатой, и для стехиометрической смеси. Характер кривых $[NO] = f(l/D_f)$ сохраняется, а значение $[NO]_{max}$ понижается с ростом концентрации водяных паров в исходной смеси. Подробный анализ влияния уровня влаги на образование NO представлен в обсуждении результатов.

На рис.8 представлен ход выгорания потока подготовленной газо-воздушной смеси вдоль оси факела при различной влажности исходной смеси. Минимальная влажность смеси соответствует случаю подачи условно сухой (без специального ввода пара) газо-воздушной смеси. Несмотря на то, что кривые изменения CO_2 и O_2 вдоль оси факела при изменении удаления от среза горелки зависят от влажности исходной горючей смеси, удалось установить практическое совпадение локализации экстремальных значений $[CO_2]_{max}$ и $[O_2]_{min}$ при варьировании абсолютно влажной смеси d_{in} от 5 до 66 г/м^3 : $h[CO_2]_{max} \approx h[O_2]_{min}$.

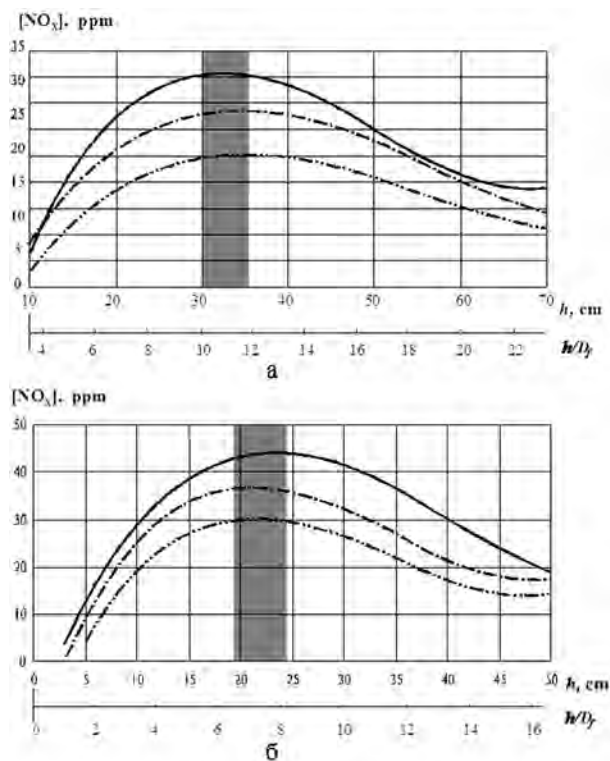


Рис.9. Концентрация $[NO]$ на оси факела в зависимости от расстояния от среза горелки при различном влагосодержании исходной газо-воздушной смеси, г/м^3 : сплошная — 10–15; штрих-пунктирная — 30–35; двойная штрих-пунктирная — 50–60. Обозначения а, б как на рис.8. Область максимальных концентраций $[NO]_{max}$ затемнена.

С учетом паросодержания потока исходной горючей смеси уровень варьирования состава соответствует температуре насыщения — точке росы до $t_{a,dew} \approx 35-45$ °С для влажного воздуха (паро-воздушной смеси). Влагосодержание воздуха при этом соответствует или слабо превышает значения, характерные для украинских климатических условий.

Картина изменения $[NO]$ в зависимости от расстояния от среза горелки при различном влагосодержании исходной газо-воздушной смеси (см. рис.5) также сопровождается достижением некоторых величин $[NO]_{max}$. Область факела выше сечений, где $[NO] \rightarrow [NO]_{max}$ на оси, характеризуется постепенным разбавлением смеси и снижением концентрации оксидов азота NO_x .

По мере увеличения влажности исходной горючей смеси уровень $[NO]$ на оси факела понижается. Изменение локальной концентрации $[NO]$ зависит от положения анализируемой точки. При повышении влажности горючей смеси соответственно меняется величина $[NO]_{max}$ в пределах факела. Область локализации участка $[NO]_{max}$ по высоте факела и удалению h от среза горелки практически сохраняется при варьи-

ровании влажности (рис.9). Область высот h , соответствующая положению $[NO]_{max}$, на указанных рис.9,а,б затемнена.

Зависимость $[NO]_{max}$ от влажности горючей смеси показана на рис.10, качественно и количественно подтверждая возможность использования добавки пара в исходную смесь с целью сокращения выбросов оксидов азота при сжигании подготовленной смеси природного газа с воздухом непосредственно в окружающей атмосфере.

Данные рис.10 указывают на возможность практически двукратного сокращения выхода оксидов азота при повышении влажности богатой горючей смеси d_{in} до более 60 г/м³. По характеру зависимость $[NO]$ от d_{in} качественно соответствует расчетным зависимостям, полученным при термодинамическом анализе влияния увлажнения воздуха-окислителя (увеличения абсолютного влагосодержания) либо путем CFD-моделировании горения подготовленных смесей в цилиндрической камере сгорания [10, 11] для условий подогрева воздуха горения.

Выводы

Выполнены экспериментальные исследования сжигания подготовленных газо-воздушных смесей и формирования свободного факела в окружающем воздухе. Установлено, что по сравнению с богатыми ($\lambda \approx 0,7$) смесями сжигание стехиометрических и оклостехиометрических ($\lambda \approx 1,05$) смесей сопровождается укорочением факела.

Предложена методология анализа влияния увлажнения воздуха-окислителя в форме атмосферного воздуха на процессы горения и образования оксидов азота NO_x в условиях экспериментальных исследований.

Отмечается экстремальный характер изменения концентраций компонент продуктов сгорания при сжигании природного газа в свободном факеле в атмосфере: с минимумом — по O_2 (компонент исходной смеси и продуктов сгорания в условиях их разбавления в атмосфере); с максимумом — по CO_2 (компонент продуктов сгорания, образуемый в факеле и постепенно разбавляемый в воздушной атмосфере). По этой же причине содержание NO_x вдоль оси факела также проходит через максимум: $[NO_x]_{max} \approx [NO]_{max}$. В настоящей работе определяющей характеристикой при обобщении данных по образованию оксидов азота в факеле служит максимальная концентрация NO_x вдоль оси факела $[NO_x]_{max}$. Каждому режиму соответствует отметка h , на которой достигается $[NO_x]_{max}$.

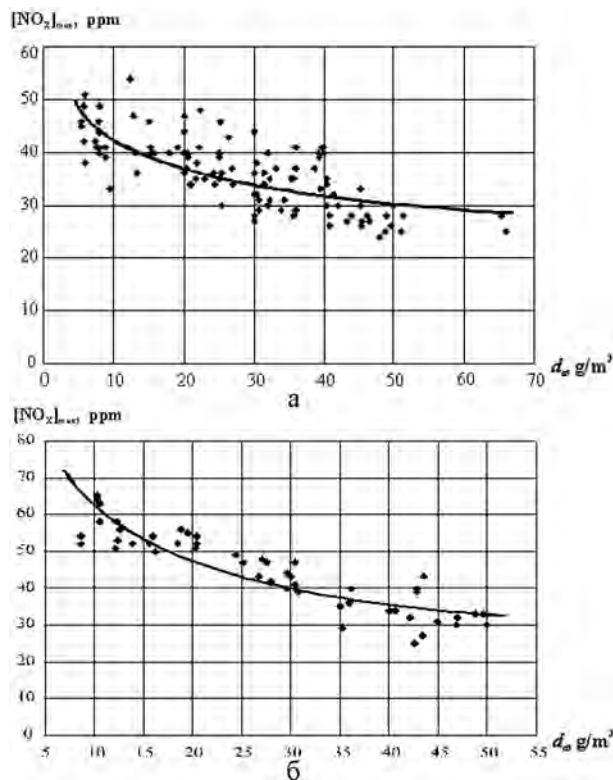


Рис.10. Зависимость $[NO_x]_{max}$ на оси факела от абсолютной влажности газопаровоздушной смеси в контрольной точке перед срезом горелки. Обозначения а, б как на рис.8.

Выявлено монотонное сокращение уровня $[\text{NO}_x]_{\text{max}}$ в свободном факеле по мере увлажнения исходной смеси природного газа с воздухом, обогащенным паром, по сравнению со случаем сжигания газа с «сухим» (условно) воздухом. При этом обеспечивается двукратное снижение $[\text{NO}_x]_{\text{max}}$ в свободном факеле стехиометрической смеси при абсолютном содержании пара в воздухе $d_a \approx 50 \text{ г/м}^3$. Это значение соответствует температуре насыщения воздуха (точке росы) примерно $35 \text{ }^\circ\text{C}$, что является вполне реальным в разных климатических зонах, особенно в дождливые летние дни.

Список литературы

1. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах : Пер. с англ. М. : Мир, 1968. 592 с.
2. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива : Справ. пособие. Л. : Недра, 1987. 336 с.
3. Брюханов О.Н., Матрюков Б.С. Аэродинамика, горение и теплообмен при сжигании топлива : Справ. пособие. СПб. : Недра, 1994. 317 с.
4. Weber E.J., Vandaveer F.E. Gas Burner Design. Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices. First Edition, Second Printing, Chapter 12. Section 12. N.Y. : The Industrial Press, 1966. P.12/193–12/210.
5. Warnatz J., Maas U. and Dibble R. Combustion-physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation, Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2006. ISBN 3-540-25992-9.
6. Kuck J. Efficiency of Vapour-Pump-Equipped Condensing Boilers. *Applied Thermal Engineering*. 1996. Vol. 16, No. 3. P. 233–244.
7. Bogdanova V., Moreau J., Guillet R. The water vapor pump technologies back in France. — http://www.ciec.fr/assets/medias/fichiers/2014-06-26-15-14-28_1457984.pdf
8. Guillet R., Terrailon G. The water Vapor Pump in Large Heating Plant from: Working Committee E, reports and papers; *20th World Gas Conference 1997*, Copenhagen, 10–13 June 1997. Groningen, The Netherlands, Int. Gas Union, 1997. Paper EP-23. P. 591–600.
9. Zdaniuk G., Moreau J., Liu L. Beijing's Burning Issue/Boilers/ NO_x Reduction, June 2017. P. 32–34. — <http://www.cibsejournal.com>
10. Сорока Б.С. Приближенный метод учета влияния состава топливной смеси на образование оксидов азота в процессах горения. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 1993. № 6. С. 47–53.
11. Сорока Б.С., Згурский В.А. Моделирование процессов переноса и образования вредных выбросов при сжигании природного газа с воздухом, увлажненным в цикле Майсоценко. *Современная наука : Исследования, Идеи, Результаты, Технологии*. 2013. № 1. С. 403–409.
12. Wet Combustion – GREENEST. New Technique of Combustion of Gases. — <http://fd.tu-berlin.de/en/research/projects/accomplished-dormant/greenest-wet-combustion/> (05.03.2018).
13. Göke S., Albin E., Gökeler K., Krüger O., Schimek S., Terhaar S., Paschereit C.O. Ultra Wet Combustion for High Efficiency, Low emission Gas Turbines. *The Future of Gas Turbine Technology : 6th International Conference*, 17–18 October, 2012, Brussels, Belgium, Paper ID Number: 17.
14. Biagioli F., Guthe F. Effect of pressure and fuel – air unmixedness on NO_x emissions from industrial gas turbine burners. *Combustion & Flame*. 2007. 151. pp. 274–288.
15. Göke S. Ultra Wet Combustion : An Experimental and Numerical Study (genehmigte Dissertation). Berlin. 2012. D83.
16. Göke S., Paschereit C.O. Influence of Steam Dilution on NO_x Formation in Premixed Natural Gas and Hydrogen Flames. Copyring 2012 by S. Göke. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. with permission. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
17. Guillet R. The Humid Combustion to Protect Environment and to Save the Fuel : The Water Vapor Pump and Maisotsenko Cycles Examples. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2011. 12 (2–4). P. 259–271.
18. Nakicenovic N. Achieving Sustainable Development Coals (Sdg) Including Energy for All Within Planetary Boundaries in Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. *SDEWES2014.1056*. 2015. P. 61–62.
19. Samuelsen S. Rich Burn, Quick-Mix, Lean Burn (RQL) Combustor. The Gas Turbine Handbook. US Department of Energy. 2006. P. 227–232.
20. Тарасенко Ю.А., Бондарев О.Ю. О камерах сгорания современных авиационных двигателей. *Megatech*. 2014. № 1–2. С. 34–56.
21. Сорока Б.С., Горупа В.В. Анализ процесса конденсации водяного пара в газовых атмосферах и продуктах сгорания. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2017. № 3. С. 3–18.
22. Сорока Б.С. Влияние климатических факторов на теплотехнические характеристики, энергетическую эффективность и оценка экологических последствий сжигания газового топлива. *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» ISJAEЕ*, 2017. Вып. 4–6. С. 1–14.
23. Soroka B., Zgurskyi V., Kozlov A., Khinkis M. Preventing autoignition inside the burner with high-temperature oxidant preheating. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2017. 18 (2). P. 113–122.

Поступила в редакцию 11.04.18

Сорока Б.С., докт. техн. наук, проф., **Корниенко А.В.,**
Кудрявцев В.С., канд. техн. наук, **Карабчиевська Р.С.**

Інститут газу НАН України, Київ

вул. Дегтярівська 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: boris.soroka@gmail.com

Скорочення викидів оксидів азоту у відкритому факелі природного газу при введенні водяної пари у потік повітря горіння

Представлено результати експериментального дослідження введення пари (H_2O) до складу підготовленої газо-повітряної суміші, що подається на горіння. Вивчено вплив пари в суміші на рівень оксидів азоту в продуктах спалювання. Описано методику експериментального дослідження, конструкцію вогневої установки та контрольно-вимірювальну апаратуру, що використані при дослідженнях. Вивчено особливості стабілізації горіння, структуру вільного вертикального факелу в залежності від складу горючої суміші, а також вміст вологи — концентрації H_2O у похідній газо-повітряній суміші. Проведено порівняльну оцінку рівня NO_x у відкритому факелі в залежності від температури та складу вихідної суміші природного газу та повітря (співвідношення «повітря : газ»). Доказано можливість двократного скорочення максимальної концентрації NO_{max} у факелі при збагаченні вихідної газо-повітряної суміші парою. *Бібл. 23, рис. 10, табл. 1.*

Ключові слова: атмосферний пальник, водяна пара, вогневий стенд, оксиди азоту, природний газ, зволоження повітря-окислювача, факел горіння, ежекційний пальник з двома активними струменями.

Soroka B.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, **Kornienko A.V.,**
Kudryavtsev V.S., Candidate of Technical Sciences, **Karabchievskaya R.S.**

The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev

39, Degtyarivska Str., 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail: boris.soroka@gmail.com

Reduction of Nitrogen Oxides Effluents within an Open Flame by Input the Water Vapour into Combustion Air Flow

The state-of-the art the problem concerning reduction the NO_x formation by humidification the combustion air is briefly considered, analyzed and discussed. The proper technologies of combustion the wet inflammable mixtures are considered for the cases of using the water vapour pump (WVP), Maisotsenko cycle (M-cycle) and suitable facilities along with the cases of operation the combined systems with heat recovery due transfer the water vapour energy to working medium (combustion products). Both environmental and power advantages of the systems of «wet combustion» have been demonstrated accordingly data collected in some earlier researches. The results of experimental researches of burning process under conditions of input the water vapour into the gas-air mixture to be supplied for combustion are presented in the paper in frame of consideration the results of own authors' tests. Given information concerning the investigation of environmental consequences of impact the water vapour within the inflammable mixture on nitrogen oxides NO_x value in combustion products ($[NO_x]$ concentration) has been generalized. The techniques of experimental researches, the design of firing rig and instrumentation, used in the tests have been described. The distinction of ignition the natural gas-air mixture and of stable flame maintenance for case of free vertical flame operation have been evaluated in dependence on inflammable mixture's composition along with studying of impact a moisture content — H_2O concentration in initial gas-air mixture. Comparative

evaluations of NO value within an open flame in dependence on temperature and on composition of initial natural gas – air mixture (ratio «air : gas») have been carried out. An opportunity of two-times reduction of maximum NO_{\max} concentration within a flame by initial gas-air mixture enrichment with water vapour has been proven. *Bibl. 23, Fig.10, Tab.1.*

Key words: atmospheric burner, combustion flame, ejection burner with two active jets, firing rig, humidification of combustion air, natural gas, nitrogen oxides, water vapor.

References

1. L'yuis B., El'ba G. Combustion, flames and explosions of gases : Transl. Eng. Mosow : Mir, 1968. 592 p. (Rus.)
2. Isserlin A.S. Basics of gas fuel combustion : Reference manual. Leningrad : Nedra, 1987. 336 p. (Rus.)
3. Bruhanov O.N., Mastrukov B.S. Fluid dynamics, combustion and heat transfer under fuel burning. Sant-Petersburg : Nedra, 1994. 317 p. (Rus.)
4. Weber E.J., Vandaveer F.E. Gas Burner Design. Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices. First Edition, Second Printing. Chapter 12. Section 12. N.Y. : The Industrial Press, 1966. P.12/193–12/210.
5. Warnatz J, Maas U. and Dibble R. Combustion – physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation, Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2006. ISBN 3-540-25992-9.
6. Kuck J. Efficiency of Vapour-Pump-Equipped Condensing Boilers. *Applied Thermal Engineering*. 1996. 16 (3). pp. 233–244.
7. Bogdanova V., Moreau J., Guillet R. The water vapor pump technologies back in France. – http://www.ciec.fr/assets/medias/fichiers/2014-06-26-15-14-28_1457984.pdf
8. Guillet R., Terrailon G. The water Vapor Pump in Large Heating Plant from: Working Committee E, reports and papers; *20th World Gas Conference 1997*, Copenhagen, 10–13 June 1997. Groningen, The Netherlands, Int.Gas Union, 1997. Paper EP-23. P. 591–600.
9. Zdaniuk G., Moreau J., Liu L. Beijing's Burning Issue/Boilers/ NO_x Reduction. June 2017. pp. 32–34. – <http://www.cibsejournal.com>
10. Soroka B.S. [An approximated method of accounting the effect of the fuel mixture composition and parameters on formation of nitrogen oxides in combustion processes]. *Ecotehnologii i Resurso-sberezhenie [Ecotechnologies and Resource Saving]*. 1993. No. 6. P. 47–53. (Rus.)
11. Soroka B.S., Zgurskiy V. CFD Modelling of Transfer Processes and of pollutant's Formation by Premixed Combustion the Natural Gasa with air Humidified by means of Maisotsenko. *Cycle in Modern Science : Reserches, Ideas, Results, Technologies*. 2013. No. 1. pp. 403–409. (Rus.)
12. Wet Combustion – GREENEST. New Technique of Combustion of Gases. – <http://fd.tu-berlin.de/en/research/projects/accomplished-dormant/greenest-wet-combustion> (05.03.2018).
13. Göke S., Albin E., Göckeler K., Krüger O., Schimek S., Terhaar S., Paschereit C.O. Ultra Wet Combustion for High Efficiency, Low emission Gas Turbines. The Future of Gas Turbine Technology : 6th International Conference, 17–18 October, 2012, Brussels, Belgium, Paper ID Number:17.
14. Biagioli F., Guthe F. Effect of pressure and fuel – air unmixedness on NO_x emissions from industrial gas turbine burners. *Combustion & Flame*. 2007. 151. pp. 274–288.
15. Göke S. Ultra Wet Combustion : An Experimental and Numerical Study (genehmigte Dissertation). Berlin. 2012. D83.
16. Göke S., Paschereit C.O. Influence of Steam Dilution on NO_x Formation in Premixed Natural Gas and Hydrogen Flames. Copyring 2012 by S. Göke. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics.
17. Guillet, R. The Humid Combustion to Protect Environment and to Save the Fuel: the Water Vapor Pump and Maisotsenko Cycles Examples. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2011. 12 (2–4). pp. 259–271.
18. Nakicenovic N. Achieving Sustainable Development Goals (Sdg) Including Energy for All Within Planetary Boundaries in Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. *SDEWES2014.1056*. 2015. pp. 61–62.
19. Samuelsen S. Rich Burn, Quick-Mix, Lean Burn (RQL) Combustor. The Gas Turbine Handbook. US Department of Energy. 2006. pp. 227–232.
20. Tarasenko Yu.A., Bondarev O.Yu. [About combustion chambers of modern aircraft engines]. *Megatech*. 2014. No. 1–2. pp. 34–56. (Rus.)
21. Soroka B., Horupa V.V. [Analysis of the Process of Condensation of Gas Atmospheres and Combustion Products]. *Energotehnologii i Resurso-sberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2017. No. 3. pp. 3–18. (Rus.)
22. Soroka B.S. [Climate factors influence over heat engineering characteristics energy efficiency and evaluation of environmental consequences of gas fuel combustion]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Alternativnaya energetika i ekologiya» [Intern. Sci. J. Alternative Energy and Ecology (ISJAE)]*, 2017, Iss. 4–6. pp. 116–129. (Rus.)
23. Soroka B., Zgurskiy V., Kozlov A., Khinkis M. Preventing autoignition inside the burner with high-temperature oxidant preheating. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2017. 18 (2). pp. 113–122.

Received April 11, 2018