



ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ

ENERGY AND ECOLOGY

ЭКОЛОГИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ И КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

ECOLOGY OF AIR ATMOSPHERE AND SPACE

Статья поступила в редакцию 21.03.18. Ред. рег. № 2655

The article has entered in publishing office 21.03.18. Ed. reg. No. 2655

УДК 504.055:536.46:662.954

**ВЛАЖНОЕ ГОРЕНИЕ – СОВРЕМЕННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ  
ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА И РЕШЕНИЯ  
ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ\***

*Б.С. Сорока*

Институт газа НАН Украины  
д. 39, ул. Дегтяревская, Киев, 03113, Украина  
тел./факс: (044)455-59-98, e-mail: boris.soroka@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2018.25-30.096-117

Заключение совета рецензентов: 10.04.18 Заключение совета экспертов: 27.04.18 Принято к публикации: 18.05.18

Рассмотрена роль воды и водяного пара в процессах горения с целью сокращения выбросов оксидов азота и углерода. Благодаря высоким значениям избыточной энтальпии пара и организации различных схем тепловой и термохимической утилизации энергии повысилось КПД использования топлива, в частности, в газовых турбинах и ДВС.

Выполнен комплекс расчетно-теоретических исследований сокращения выбросов оксидов азота и углерода при сжигании газового топлива (природного газа) в зависимости от влажности атмосферного воздуха с помощью двух подходов: CFD-моделирования с привлечением DRM 19 механизма горения метана на 19 компонентов и механизма Боумана в качестве «постпроцессора» для определения концентрации [NO]; различные термодинамические модели прогноза образования оксидов азота NO.

Численные расчеты процессов переноса импульса, теплоты и массы, проведенные в единой системе с уравнениями химической кинетики для реакций горения по механизму GRI, и расчет образования NO, выполненный как постпроцессор по механизму Боумана, позволили определить фактическое содержание [CO] и [NO] в зависимости от режимных условий горения и конструкции топочного устройства. При этом термодинамика равновесного состояния продуктов сгорания даёт возможность оценить только относительное изменение концентрации [NO], которое обусловлено влиянием на горение отклонений, вносимых исходными составами реагентов, параметрами состояния горючей (топливоокислительной) смеси и характеристиками процесса горения.

Разработана методология CFD-моделирования и изложены результаты численного анализа влияния относительной влажности атмосферного воздуха в диапазоне  $\varphi = 0-100\%$  на концентрации [NO] и [CO] на выходе из топочной камеры. Установлено резкое, более чем на порядок сокращение выбросов NO и одновременно примерно двукратное снижение концентрации CO при сжигании метановоздушной смеси в условиях увлажнения воздуха горения до состояния насыщения при температуре 325 K.

Выполнен комплекс экспериментальных исследований по влиянию увлажнения атмосферного воздуха на структуру и экологические характеристики факела при сжигании природного газа в открытом факеле подготовленной смеси, а также предложена методология оценки образования оксидов азота в зависимости от влажностного содержания горючей смеси. Результаты измерений использованы для верификации расчетных данных. Совпадение относительного изменения выхода NO (NO<sub>x</sub>) в результате увлажнения воздуха горения, получен-

\*Сорока Б.С. Влажное горение – современное направление экологически чистого сжигания топлива и решения проблемы устойчивого развития энергетики // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;25-30:96-117.



ное расчетным и опытным путем, подтвердило качественное и количественное соответствие предложенных физико-химических моделей и процедур CFD-анализа изучаемым процессам.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика; влажное горение; атмосферный воздух; влажность абсолютная и относительная; влажный воздух; горение газа; математическое и компьютерное моделирование; оксиды азота NO; оксиды углерода CO; устойчивое развитие.

## WET BURNING – THE MODERN TREND IN ENVIRONMENTAL BENIGN FUEL COMBUSTION AND IN SOLUTION TO THE PROBLEM OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE POWER GENERATION

*B.S. Soroka*

The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (NASU)  
39 Degtyarivska St., Kyiv, 03113, Ukraine  
tel./fax: (044) 455 59 98, e-mail: boris.soroka@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2018.25-30.096-117

Referred 10 April 2018 Received in revised form 27 April 2018 Accepted 18 May 2018

The article considers the role and place of water and water vapor in combustion processes with the purpose of reduction the effluents of nitrogen oxides and carbon oxide.

We have carried out the complex of theoretical and computational researches on reduction of harmful nitrogen and carbon oxides by gas fuel combustion in dependence on humidity of atmospheric air by two approaches: CFD modeling with attraction of DRM 19 chemical kinetics mechanism of combustion for 19 components along with Bowman's mechanism used as "postprocessor" to determine the [NO] concentration; different thermodynamic models of predicting the nitrogen oxides NO formation.

The numerical simulation of the transport processes for momentum, mass and heat being solved simultaneously in the united equations' system with the chemical kinetics equations in frame of GRI methane combustion mechanism and NO formation calculated afterwards as "postprocessor" allow calculating the absolute actual [CO] and [NO] concentrations in dependence on combustion operative conditions and on design of furnace facilities. Prediction in frame of thermodynamic equilibrium state for combustion products ensures only evaluation of the relative value of [NO] concentration by wet combustion the gas with humid air regarding that in case of dry air – oxidant.

We have developed the methodology and have revealed the results of numerical simulation of impact of the relative humidity of atmospheric air on harmful gases formation. Range of relative air humidity under calculations of atmospheric air under impact on [NO] and [CO] concentrations at the furnace chamber exit makes  $\varphi = 0 - 100\%$ . The results of CFD modeling have been verified both by author's experimental data and due comparing with the trends stated in world literature. We have carried out the complex of the experimental investigations regarding atmospheric air humidification impact on flame structure and environmental characteristics at natural gas combustion with pre-mixed flame formation in open air.

The article also proposes the methodology for evaluation of the nitrogen oxides formation in dependence on moisture content of burning mixture. The results of measurements have been used for verification the calculation data. Coincidence of relative change the NO (NO<sub>x</sub>) yield due humidification the combustion air revealed by means of CFD prediction has confirmed the qualitative and the quantitative correspondence of physical and chemical kinetics mechanisms and the CFD modeling procedures with the processes to be studied.

A sharp, more than an order of reduction in NO emissions and simultaneously approximately a two-fold decrease in the CO concentration during combustion of the methane-air mixture under conditions of humidification of the combustion air to a saturation state at a temperature of 325 K.

Keywords: renewable energy; wet burning; atmospheric air; carbon oxides CO; CFD modeling; gas combustion; humid air; humidity absolute and relative; nitrogen oxides NO; sustainable development.





*Борис Семенович Сорока*  
*Boris Soroka*

**Сведения об авторе:** д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом высокотемпературного теплообмена Института газа НАН Украины.

**Награды:** Премия Национальной академии наук (НАН) Украины им. Г.Ф. Проскуры за выдающиеся достижения в энергетике (2006 г.); Международная премия Национальной академии наук Республики Беларусь им. академика А.В. Лыкова в составе международного коллектива (2007 г.); Премия НАН Украины им. В.И. Толубинского за цикл работ в области прикладной теории горения (2017 г.). Почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники Украины» (2012 г.); победитель всеукраинского конкурса «Изобретение года» в номинации «Энергетика и энергоэффективность» (2014 г.).

**Образование:** Киевский политехнический институт (1962 г.).

**Область научных интересов:** эффективное использование топлива; прикладная теория горения, включая химическую термодинамику и кинетику с учетом процессов переноса: аэродинамику, теплообмен, включая радиационный, конвективный и сложный теплообмен; расчеты высокотемпературных процессов и установок; CFD моделирование процессов и камер сгорания; теплотехническое оборудование и энергоустановки; экология и образование вредных веществ.

**Публикации:** свыше 430, в том числе 24 книги (монографии и отдельные издания), 65 патентов.

*h*-index 5

ORCID: 0000-0001-9174-0992

**Information about the author:** D.Sc. (Engineering), Professor, Head of Department of High Temperature Heat & Mass transfer of the Gas Institute, National Academy of Sciences, Ukraine (NASU).

**Education:** Kiev Polytechnic Institute, 1962.

**Awards:** G.F. Proskura's Premium NASU for individual cycle of the works in combustion ecology and energy efficiency, 2006; Academician A.V. Lyikov's Premium, Byelorussian Academy of Sciences, for the cycle of works in area of heat-and – mass transfer under chemical reactions, 2007; V.I. Tolubinsky's Premium NASU for the cycle of works in Applied Combustion Theory, 2017. National title of Honored Member in Science & Technology of Ukraine, 2012; Award for Ukrainian competition "Invention of Year" in "Energetics and Energy Saving", nomination, 2014.

**Research interests:** efficiency of fuels utilization; applied combustion theory including chemical thermodynamics and kinetics, along with transportation constituents: fluid dynamics heat and mass transfer including radiative, convective and combined heat transfer; computation of high-temperature processes and equipment; the CFD modeling of combustion processes and chambers; heat engineering equipment and power plants; environmental aspects and pollutants formation.

**Publications:** 430 including 24 monographs and separate issues, and 65 patents.

## Введение

За последние десятилетия в рамках проблемы устойчивого развития энергетические проблемы приобрели особую значимость для обеспечения нормального существования и прогресса человечества. Важнейшее значение на нынешнем этапе приобрели экологические аспекты энергетики: проблема борьбы с загрязнением атмосферы, образование вредных веществ и климатические воздействия парниковых газовых выбросов.

Несмотря на неоднозначность гипотезы о климатических изменениях, обусловленных антропогенными факторами, прежде всего выбросами углеродсодержащих соединений, включая парниковые газы, мировое сообщество вовлечено в решение проблем, отмеченных в Рамочной конвенции ООН об изменении климата, а также в Парижском межгосударственном соглашении (2015 г.), в которых заявлен постепенный переход к низкоуглеродному развитию, то есть сокращение использования органического (минерального) топлива и замена топливной энергетики возобновляемой.

С другой стороны, указанный тренд, признанный в странах ЕС, не является общемировым и не подтверждается рядом международных организаций, которые прогнозируют рост абсолютного потребления органического топлива на ближайшие десятилетия [1]. Так, в соответствии с прогнозом US Energy Information Administration (EIA), предполагается сохранение позиции традиционных источников первичной энергии вплоть до 2040 г. В 2010-е гг. доля органического топлива, включая биотопливо, в мировом потреблении энергии составляла 84 %, а в 2040 г. – ожидается на уровне 78 %. Таким образом, за 30 лет топливопотребление сократится всего на 6 %, доля природного газа несколько вырастет (23 % вместо 22 %), при этом доля возобновляемых источников составит лишь 15 % [2].

В последние годы наметилась тенденция использования процессов влажного горения в атмосферном воздухе, которые способствуют резкому сокращению выбросов NO<sub>x</sub> и одновременному снижению концентрации CO при вводе пара в зону горения [3]. Более того, экологические преимущества влажного горения могут сочетаться с повышением энергетической эффективности систем использования топлива в случае



утилизации выбросной энергии продуктов сгорания с повышенным содержанием пара, имеющего высокую избыточную энтальпию, при комбинировании нескольких процессов и/или установок [4].

В работе впервые процессы влажного горения представлены в качестве способа экологически чистого сжигания топлива; проведены систематические расчетно-теоретические исследования с использованием CFD-моделирования процесса горения природного газа с влажным атмосферным воздухом, где абсолютная влажность (влагосодержание) рассматривается как функция исходной температуры  $T_a$  воздуха-окислителя (и, соответственно, условий его насыщения). Влагосодержание при заданном  $T_a = \text{const}$  определяется климатическими температурно-влажностными условиями (относительной влажностью)  $\varphi_a$ . Кроме того, установлено, что с ростом  $\varphi_a$  в условиях влажного горения наблюдается одновременное понижение концентраций [NO] (резкое) и [CO] (менее существенное) по сравнению с сухим горением, тем более выраженное, чем выше температура  $T_a$  воздуха горения.

В результате в работе впервые установлено влияние климата на основные характеристики процесса

горения, включая скорость горения (распространения пламени), температуру, время горения и др., на загрязнение атмосферы вредными и токсичными выбросами, а также на энергетическую эффективность использования топлива.

В задачи исследования входили оценка роли воды в процессах энергообмена и при экологически чистом сжигании топлива; проведение теоретического анализа с помощью CFD-моделирования с целью численного анализа роли влажности атмосферного воздуха, используемого при горении в качестве окислителя, как средства подавления выбросов оксидов азота NO и углерода CO; создание методологии и огневой установки для экспериментальных исследований процесса влажного горения в открытом факеле; проведение анализов подготовленной газозоудушной смеси до и в процессах горения; исследование влияния увлажнения воздуха горения на структуру факела в открытой атмосфере и на возможность сокращения образования оксидов азота NO ( $\text{NO}_x$ ); использование полученных опытных данных для верификации результатов CFD-моделирования, обобщения выводов проведенного анализа и выработки практических рекомендаций.

| <b>Список обозначений</b>        |  |
|----------------------------------|--|
| <u>Буквы греческого алфавита</u> |  |
| $\varepsilon$                    | Излучательная способность  |
| $\eta_f$                         | КПД использования топлива  |
| $\lambda$                        | Коэффициент избытка воздуха  |
| $\varphi$                        | Относительная влажность  |
| $\Omega_{st}, \Omega_{st}^*$     | Массовое стехиометрическое число, кг окислителя/кг топлива   |
| <u>Буквы латинского алфавита</u> |  |
| $d$                              | Влагосодержание абсолютное, кг $\text{H}_2\text{O}$ /кг сухого воздуха   |
| $I$                              | Полная (химическая) энтальпия, МДж/м <sup>3</sup>  |
| $\Delta I = I - I_0$             | Избыточная полная энтальпия, МДж/м <sup>3</sup>  |
| $M$                              | Молекулярная масса, кг/моль  |
| $\dot{m}$                        | Массовый поток, кг/с   |
| $n$                              | Число молей  |
| $p$                              | Давление, общее парциальное, Па (кПа, МПа)   |
| $Q$                              | Теплота сгорания МДж/м <sup>3</sup>  |
| $t(T)$                           | Температура, 0С (К)  |
| $\dot{V}$                        | Объемный поток в нормальных условиях м <sup>3</sup> ч  |
| $W_0$                            | Число Воббе, МДж/м <sup>3</sup>  |
| [X]                              | Концентрация компонента X в смеси  |
| <u>Индексы верхние</u>           |  |
| *                                | Для базовой топливовоздушной смеси, т.е. взятой при $T_0, p_0$ и коэффициенте избытка воздуха $\lambda = 1,0$                          |
| $u$                              | Указатель единицы количества продуктов сгорания, к которой относится рассматриваемая величина: $u \equiv \text{кг, nm}^3, \text{моль}$ |
| <u>Индексы нижние</u>            |  |
| $a$                              | Атмосферный воздух, воздух горения   |
| $dew$                            | Состояние точки росы   |
| $\text{H}_2\text{O}$             | Водяной пар  |
| $eq$                             | Равновесная (для теплоты сгорания)   |
| $ex$                             | На срезе топочной камеры   |
| $f$                              | Топливо  |
| $fl$                             | Продукты сгорания, уходящие газы   |
| $g$                              | Газы, смесь продуктов сгорания   |

Продолжение списка обозначений

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <i>h</i>                           | Высшая для теплоты сгорания и числа Воббе  |
| <i>in</i>                          | Для исходных компонент   |
| <i>l</i>                           | Низшая для теплоты сгорания и числа Воббе  |
| <i>ng</i>                          | Природный газ (natural gas)  |
| <i>pr</i>                          | Первичная горючая смесь  |
| <i>prod</i>                        | Для продуктов сгорания   |
| <i>r</i>                           | Для теплоты реакции  |
| <i>sat</i>                         | Состояние насыщения  |
| <i>st</i>                          | Для стехиометрического числа   |
| <i>v</i>                           | Для H <sub>2</sub> O (пара)  |
| <i>w</i>                           | Для H <sub>2</sub> O (воды)  |
| 0                                  | При стандартных условиях ( $T = 298,15 \text{ K}$ ; $p = 101,325 \text{ кПа}$ )                                    |
| <b>Аббревиатуры</b>                |  |
| API 535                            | Нормативы (США, American Petroleum Institute (API) Publication)  |
| BG                                 | Биогаз   |
| H                                  | (Russland, Nordsee, Danemark) – типы природного газа H в ЕС  |
| NG                                 | Природный газ  |
| RED                                | (Renewable Energy Directive) 20090/28/EC – директива Евросоюза   |
| sensible (SH) and (LH) latent heat | Физическое теплосодержание и скрытая теплота физических процессов («испарение – конденсация») и химических реакций |
| WVP water vapor pump               | Паровой насос  |



## 2. Анализ взаимного влияния процессов сжигания топлива и климатических изменений

### 2.1. Проблема устойчивого развития энергетики

На саммите Организации Объединенных Наций по устойчивому развитию в сентябре 2015 г. в Нью-Йорке защите климата посвящена одна из 17 резолюций, принятых там впервые в международном праве. В соответствии с Парижским климатическим соглашением в конце 2015 г. мировое сообщество поставило перед собой цель ограничить глобальное потепление к 2050 г. значительно ниже 2 °С – не более 1,5° С. До настоящего времени подписали Парижское климатическое соглашение 2015 г. более 195 стран, 153 из которых уже ратифицировали его [3]. По мнению экспертов, для достижения цели ограничения глобального потепления выбросы парниковых газов во всем мире должны быть сокращены до нуля в период с 2015 г. по 2050 г. [3].

ЕС скорректировал европейские задачи в области климата: к 2030 г. выбросы парниковых газов должны быть сокращены на 40 %, а к 2050 г. – на 80 ÷ 95 % (по сравнению с 1990 г.). Не менее 27 % от общего потребления энергии должно обеспечиваться из возобновляемых источников энергии [3].

Все государства-члены ЕС обязались подготовить национальные планы действий по достижению европейских климатических целей. Германия уже представила План действий по климату до 2050 г. [3].

### 2.2. Взаимосвязь характеристик атмосферы и климата с образованием вредных веществ при горении

Отдельные аспекты воздействия процессов сжигания топлива на климат рассматривались в работе [4].

До настоящего времени ограниченно изучалась проблема «климат – процессы горения» как влияние

глобального и локального климата на процессы горения различных видов топлива, а также на энергетическую эффективность и экологические последствия использования топлива в отдельных регионах мира. При такой постановке проблемы рассматривается, прежде всего, воздействие температурно-влажностных характеристик атмосферного воздуха на образование токсичных компонентов при горении.

В работе [5] особое внимание обращено на влияние климата, определяемое через температурно-влажностные характеристики атмосферы с учетом содержания O<sub>2</sub> в воздухе, поступающем на сжигание топлива, при сопутствующем воздействии на коэффициент избытка воздуха. В свою очередь, характеристики воздуха в значительной мере влияют на состав продуктов сгорания и содержание в них токсичных веществ.

Среди факторов, определяющих климатические изменения и влияющих на уровень выброса вредных веществ (прежде всего NO<sub>x</sub> и CO) при эксплуатации энергетического оборудования, необходимо упомянуть дневные и сезонные изменения погоды, которые включают температуру *T*, давление *p* и влажность (абсолютное влагосодержание *d<sub>a</sub>*) окружающего воздуха. Имеются указания на особую роль растительности и ветра в числе факторов воздействия на образование вредных веществ (NO<sub>x</sub> и CO) и загрязнение атмосферы [5].

Регламентирующий документ API 535 (США, American Petroleum Institute) устанавливает связь между выбросами [NO<sub>x</sub>] и избыточным O<sub>2</sub> в исходной газо-воздушной смеси. Содержание [O<sub>2</sub>] при выходе из горелки и, соответственно, [NO<sub>x</sub>] при горении зависит от параметров атмосферного воздуха: *T*, *p*, *d<sub>a</sub>*. Кроме того, даже изменение характеристик ветра может сильно повлиять на давление в дымовой

трубе и, как следствие, на процессы горения в топках и камерах сгорания [3].

## 2.2. Парниковые газы.

### Возможные источники $\text{CO}_2$ и $\text{O}_2$

К парниковым газам, задерживающим теплоту в атмосфере, относятся: диоксид углерода  $\text{CO}_2$ , метан  $\text{CH}_4$ , закись азота  $\text{N}_2\text{O}$ , фторсодержащие газы, причем выбросы каждого из них даются в  $\text{CO}_2$ -эквиваленте (GWP – Global Warning Potential). При этом общие выбросы этих веществ в США в 2014 г. составили 6, 87 млрд т GWP, из которых 81 % приходится на  $\text{CO}_2$ , 11 % – на  $\text{CH}_4$ , 6 % – на  $\text{N}_2\text{O}$ , 3 % на фторсодержащие компоненты [6]. В результате глобальное потепление увязывают главным образом с  $\text{CO}_2$ . Селективность излучения перечисленных многоатомных газов (в первую очередь –  $\text{CO}_2$ ) и связанное с этим различие падающих на Землю тепловых потоков и потоков, излучаемых земной поверхностью с учетом поглощения в атмосфере, служит причиной повышения температуры приземных слоев атмосферы.

При оценке воздействия селективности излучения газовой среды на парниковый эффект следует иметь в виду, что  $\text{H}_2\text{O}$  характеризуется близкими к  $\text{CO}_2$  спектральными характеристиками, а концентрация водяных паров на порядки превосходит концентрацию  $\text{CO}_2$ . Тот факт, что особая роль водяных паров в атмосфере не учитывается – одна из причин, вызывающих сомнения относительно роли  $\text{CO}_2$  и перечня факторов влияния на климат. Однако неоднозначное отношение к проблеме климатических изменений и глобального потепления не сказывается на чрезвычайной актуальности проблемы взаимного влияния процессов горения и формирования климата.

Наряду с влиянием влаги как фактора природной среды огромный интерес вызывает использование  $\text{H}_2\text{O}$  в жидкой и газообразной форме в качестве дополнительного компонента исходной топливоокислительной смеси, позволяющего сократить выбросы вредных веществ, прежде всего оксидов азота, а также повысить КПД использования топлива при специальных схемных решениях [7].

Содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере зависит от множества природных факторов, не связанных с человеческой деятельностью. Например, огромное значение имеет факт поглощения значительной доли  $\text{CO}_2$  фитопланктоном мирового океана (в США, особенно в районе Карибского бассейна) [8].

Долгое время основным источником кислорода считались тропические леса, но в настоящее время экспертное сообщество полагает, что эта роль была переоценена, так как не меньшее значение имеет Мировой океан. Другой, помимо поглощения  $\text{CO}_2$ , важной функцией океанического фитопланктона является генерирование почти 50 % кислорода, поступающего в атмосферу в процессе фотосинтеза [8]. Следует отметить ещё один положительный момент относительно морской экосистемы Мирового океана, в частности фитопланктона, питающегося пылью

африканских пустынь благодаря мощи ветров и необычайной сухости почв африканских пустынь.

## 2.3. Проблемы устойчивого развития в энергетике.

### Вклад возобновляемых источников энергии

Задача декарбонизации глобальной экономики в условиях трансформации структуры первичных энергоисточников и при оценке будущего, свободного от углерода, является парадигмой революционного преобразования энергетики [9]. Новый период характеризуется переходом к возобновляемой энергетике [10]. А взаимосвязанный комплекс проблем «энергия – вода – пища» определяет цели и направления устойчивого развития энергетики, человеческой цивилизации и общества в целом [9].

Таким образом, в рассматриваемом контексте «устойчивое развитие» – многопараметрическое понятие, определяемое взаимосвязанными материальными потоками и потоками энергии, учитывающее состояние атмосферы, локальные и глобальные климатические изменения, образование и рассеивание вредных веществ в атмосфере.

В статье [11] автор указывает на глобальную роль воды в производстве энергии и на значимость энергии, затрачиваемой на транспортировку воды (на различные составляющие процессов переноса воды). Следовательно, вода и энергия – чрезвычайно взаимосвязанные понятия: из воды получают пар, который вращает турбину, приводящую в движение генератор, который производит энергию. Источник энергии не имеет значения: ископаемые минеральные виды топлива (уголь, нефть), энергоисточники ядерного или солнечного происхождения – во всех случаях теплота отбирается при охлаждении воды.

Термоэлектрические установки на минеральном топливе используют  $30,2 \div 60,4$  л воды для обеспечения работы 60 Вт лампочки в течение 12 ч в день, или та же лампочка потребляет  $11\,340 \div 23\,814$  л воды в год. Расход воды на производство 1 кВт·ч зависит от источника энергии и типа энергоустановки. По приведенным оценкам DoE (Министерство энергетики США) для энергоустановок на угле и нефти требуется  $3,78 \div 7,56$  л / кВт·ч, в то время как для гидроустановок – 68 л/кВт·ч (расход воды в зависимости от штата: в Аризоне и Южной Дакоте – 272 л / кВт·ч, в Калифорнии – 17 л / кВт·ч).

Необходимо учитывать, что эти цифры относятся к потреблению, а не к отбираемому количеству воды. Большое количество воды, используемой для охлаждения энергоустановок, возвращается в водоемы, откуда вода была отобрана (реки, океаны). Так, в Калифорнии 49 % отбираемого объема воды используется в энергетике. Однако потребление воды для производства энергии – только часть картины, поскольку энергию надо перемещать, трансформировать. В Калифорнии, например, на транспортировку идет 20 % энергии.

Специалисты по устойчивому развитию относят к энергоустановкам только те, которые питаются элек-



троэнергией и в качестве топлива предпочтительно используют водород и метан, получаемые из возобновляемых источников энергии или биотоплива. Ключевую роль в предупреждении климатических изменений играет повышение энергоэффективности и сохранение топливных ресурсов, прежде всего за счет максимальной утилизации выбросной энергии продуктов сгорания.

#### 2.4. Анализ составляющих и пути решения и проблемы устойчивого развития

В соответствии с существующими представлениями выбросы парниковых газов, обусловленные производством энергии, работой транспорта, промышленности, домашними хозяйствами, торговлей, вносят свой вклад в изменение климата, при этом роль перечисленных секторов в различных государствах отличается.

Поиск распределения выбросов основан на так называемом принципе источника (измеряется в месте происхождения или обеспечивается в соответствии с принципом «загрязнитель платит») [3]. К сектору «промышленность» относят выбросы от процессов сжигания, промышленных технологий и самообеспечения обрабатывающей промышленности.

Наибольшее значение для климатических изменений имеют выбросы парниковых газов в промышленности, особенно в металлургии (доменное, сталеплавильное, агломерационное производства).

Перечисленные технологии связаны с огромными выбросами CO<sub>2</sub>, однако в силу изложенных причин вероятность полного перевода печного хозяйства на альтернативные источники энергии к 2050 г. и отказа от органического топлива в соответствии с европейскими прогнозами [3] отсутствует. К этому следует добавить отдельную проблему использования и утилизации технологических газов (коксового, доменного, генераторного и других газов).

Ряд европейских экспертов делают менее жесткие прогнозы относительно отказа использовать минеральное топливо в недалеком будущем, чем официальные программы ЕС. Так, в работе [12] указывается на перспективность использования природного газа наряду с биометаном как топлива, обеспечивающего сохранение климата, исходя из уровня выбросов CO<sub>2</sub>. Особую популярность находят предложения о добавлении к рекомендуемым топливам до 10 % водорода, производимого за счет возобновляемых источников избыточной электроэнергии.

В последние годы в рамках устойчивого развития получают распространение газовые топлива биологического происхождения и газы, продуцируемые с привлечением возобновляемых источников энергии по сценарию «от энергии к газовому топливу». В результате расширяется диапазон покомпонентных составов горючих газов, а характеристики горения природного газа (NG) в европейских газовых сетях при подмешивании к NG искусственно получаемых продуктов становятся более разнообразными [12–14]. К

числу добавляемых газов, прежде всего, относятся водородсодержащие компоненты, а также газы, включающие молекулярный водород, в том числе искусственно созданные в исследовательских центрах Германии газовые смеси: H– Gas1 GWI, H– Gas 3 GWI, H– Gas1 DBI, H– Gas1 DBI [13] (диапазон числа Воббе этих газов близок к Wo для природного газа типа L).

Биометан, произведенный из загрязненного источника, может нести нежелательные включения, которые необходимо контролировать. Водород и метан, производимые с привлечением электричества от избыточных возобновляемых источников, являются высокочистыми и подобно биометану обеспечивают сокращение выбросов CO<sub>2</sub> [12].

Особое место занимают предложения о впрыске (вводе) H<sub>2</sub> из возобновляемых источников в сеть с природным газом [14], что позволяет использовать значительные емкости транспорта и хранения из существующей инфраструктуры, в частности трубопроводы высокого давления, в целях непрямого транспортировки и хранения электричества.

Речь идет о подмешивании к NG до 10 % H<sub>2</sub> по объему на отдельных участках системы [14]. Серьезные ограничения содержания H<sub>2</sub> в сети NG [14] касаются:

- подземных хранилищ в пористой породе с целью предупреждения образования H<sub>2</sub>S (ограничения по содержанию H<sub>2</sub> в природном газе не установлены);
- стальных емкостей в сухопутных транспортных средствах на природном газе NG, газовых двигателях и ДВС, работающих на NG (рекомендуется до 2 % H<sub>2</sub>);
- двигателей с системой управления при обеспечении оговоренного метанового числа для смешанного топлива (до 10 % H<sub>2</sub>);
- газовых турбин (ограничения до 1 % H<sub>2</sub>).

### 3. Расчетно-теоретический анализ экологических преимуществ влажного горения

Возможности существенного сокращения выбросов оксидов азота NO<sub>x</sub> в условиях влажного горения, в частности при сжигании природного газа с увлажненным воздухом, широко известны, а результаты исследований изложены, например, в монографии [15] применительно к конкретным технологиям и устройствам влажного горения. При этом важно одновременно учитывать образование CO и NO<sub>x</sub>, что обусловлено противоположными, как правило, трендами изменения [NO] и [CO] под действием различных факторов [15].

Следует иметь в виду, что определение [NO] возможно как процедура постпроцессор по зависимостям Боумена [16] без привлечения транспортных уравнений, а расчет [CO] требует учета химических реакций (механизмов) горения наряду с процессами переноса массы и теплоты [17].

Существенное значение имеют специальные методы низкоэмиссионного, в том числе low NO<sub>x</sub> сжи-



гания, в частности обеспечиваемого FLOX-системой сжигания топлива [15, 18]. Именно распределение концентрационных полей горючего и окислителя при входе в камеру сгорания (КС) и режимные характеристики работы КС определяют уровень токсичных выбросов. Сочетание методов низкоэмиссионного и влажного сжигания может обеспечить мультипликативный эффект снижения вредных выбросов в атмосферу.

### 3.1. CFD-моделирование процесса влажного горения

Для выявления закономерностей образования токсичных выбросов – NO и CO – при сжигании под-

готовленной смеси природного газа (метана) с воздухом в цилиндрической камере сгорания КС (рис. 1) со стенками, имеющими заданную и неизменную вдоль поверхности температуру  $T_w = \text{const} = 1\,200\text{ K}$ , то есть при граничных условиях 1-го рода, выполнен расчетно-теоретический анализ с помощью CFD-моделирования [17]. Исследования проведены при заданных значениях расхода смеси  $m_0 = 2,436 \cdot 10^{-2}\text{ кг/с}$ , тепловой мощности  $Q_f = 58,6\text{ кВт}$ , коэффициенте избытка воздуха  $\lambda = 1,15$ . При этом теплоотдача конвекцией и излучением к стенке со стороны движущегося горящего потока определяется формированием полей скорости, температуры и концентрации.

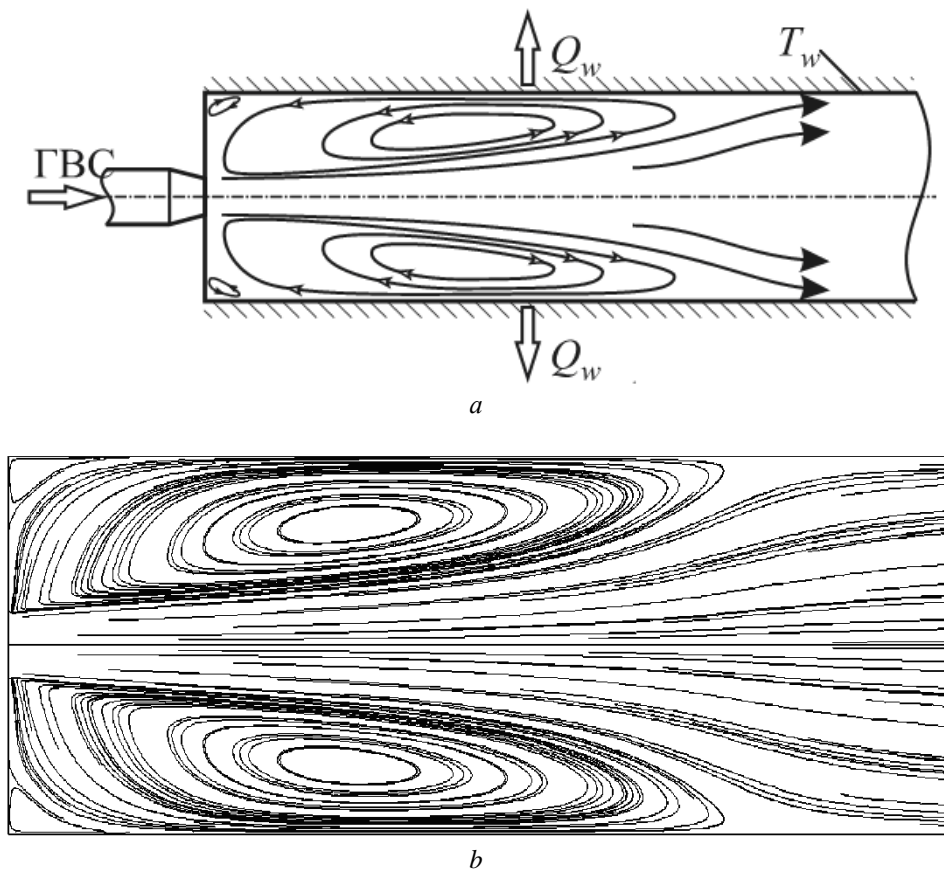


Рис. 1 – Сжигание подготовленной ГВС в цилиндрической камере сгорания: а – течение продуктов сгорания; б – распределение линий тока в камере сгорания по результатам CFD-моделирования (окислитель – сухой воздух,  $T_a = 300\text{ K}$ ,  $T_w = 1\,200\text{ K}$ )

Fig. 1 – Combustion of premixed gas-air flow (GAM–gas air mixture) within cylinder combustion chamber: a – combustion products flow; b – stream lines within the combustion chamber accordingly the results of CFD modeling (oxidant– dry air,  $T_a = 300\text{K}$ ,  $T_w = 1200\text{K}$ )

В качестве источников члена в уравнениях переноса энергии используется теплота, обусловленная кинетикой протекания реакций горения. Основные вычисления были проведены при модифицированном механизме горения метана GRI– Mech version 1.2 [19], обозначаемого как DRM 19 на 19 компонентов и более 80 реакций. При этом азотсодержащие вещества, включая оксиды азота NO, в число компонентов реакций горения не входят, а используются

при расчете [NO] через постпроцессор по системе уравнений Боумана. Молекулярный азот и аргон учитывался как третьи тела в уравнениях горения, а механизм турбулентности – с k-ε-моделью турбулентности.

Единственными варьируемыми параметрами при расчетах являются температура воздуха горения  $T_a = 300\text{ K}$  и  $325\text{ K}$  и абсолютное влагосодержание воздуха-окислителя  $d_a$ , которое изменялось от 0

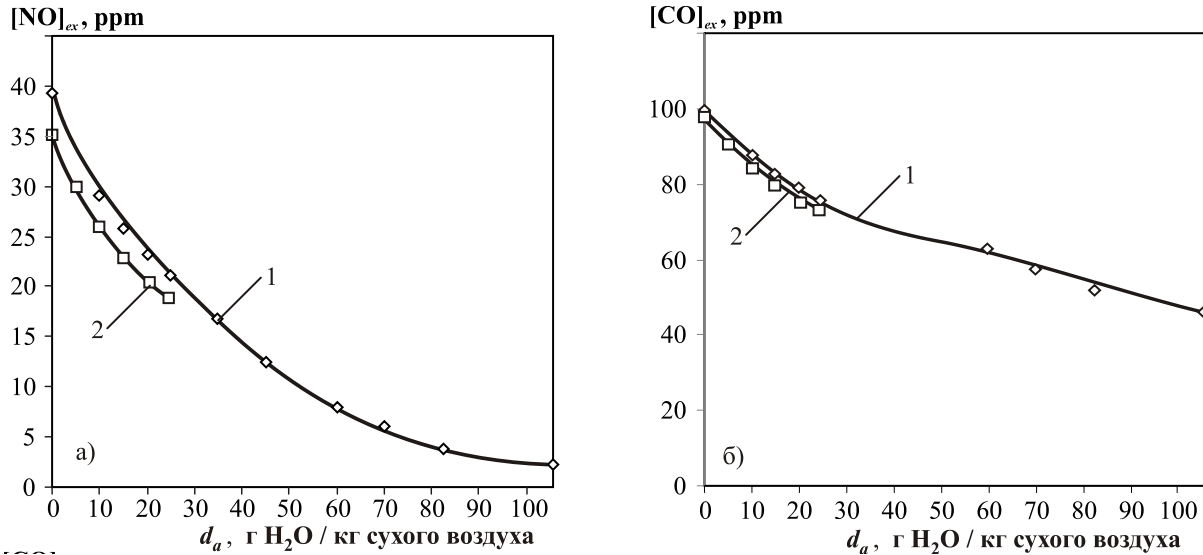


(сухой воздух) до значения  $d_{a,sat}$ , соответствующего насыщению при указанных температурах: 24,4 г/кг и 105,6 г/кг сухого воздуха соответственно.

Основное внимание уделено экологическим характеристикам КС и теплоотдаче к стенкам камеры  $Q_w$ .

Значение воспринятого теплового потока при описанных условиях служит мерой энергетической эффективности КС, определяющей ее КПД:  $\eta_f = Q_w / Q_f$ .

Результаты CFD-моделирования представлены на рис. 2.



**Рис. 2** – Зависимости [NO] (а) и [CO] (б) на выходе из камеры сгорания от влагосодержания воздуха  $d_a$ :  
 $T_w = 1200\text{ K}$ ;  $T_a$ : 1 – 325 K, 2 – 300 K

**Fig. 2** – Dependence of concentrations the harmful effluents [NO] (a) and [CO] (b) at the exit of combustion chamber on the absolute moisture content  $d_a$  of an air-oxidant:  $T_w = 1200\text{ K}$ ;  $T_a$ : 1 – 325K, 2 – 300K

Установлено монотонное сокращение выбросов оксидов азота NO и углерода CO по мере роста  $d_a$ . При  $T_a = 300\text{ K}$  в располагаемых пределах влагосодержания воздуха горения  $d_a \in \{0; d_{a,sat}\}$  [NO] сокращается в 1,86 раза – от 35,2 ppm до 18,9 ppm. При 325 K эти возможности резко увеличиваются: снижение [NO] более чем на порядок (от 39,3 ppm до 3,8 ppm) наблюдается уже при  $d_a = 82,65\text{ г/кг}$  сухого воздуха, что соответствует относительной влажности воздуха 81 % (рис. 2a).

Известно, что подогрев воздуха горения является важнейшим фактором экспоненциального роста [NO] [18], однако слабое изменение  $T_a$  (от 300 K до 325 K) влияет незначительно на рост NO ( $\text{NO}_x$ ) в условиях сухого воздуха горения или при неизменном абсолютном влагосодержании ( $d_a = \text{const}$ ) в случае влажного воздуха-окислителя ([NO] – рис. 2a, [CO] – рис. 2b).

Вместе с тем варьирование температуры подогрева воздуха всего в 25 K достаточно, чтобы резко сократить образование NO за счет возможности сопутствующего серьезного повышения влагосодержания до уровня насыщения  $d_{a,sat}$ , отвечающего  $T_a$ . Указанное увеличение  $T_a$  (25K) соответствует росту  $d_{a,sat}$  более чем в 4 раза. Это приводит к росту доли  $\text{H}_2\text{O}$  в смеси исходных реагентов горения, снижению кон-

центрации горючих и окислительных компонентов в исходной смеси и росту содержания балласта. В результате наблюдается понижение температуры горения, изменение кинетики горения и снижение скорости образования токсичных NO и CO, что, как следствие, приводит к снижению концентрации этих компонентов ([NO] и [CO]) в продуктах сгорания.

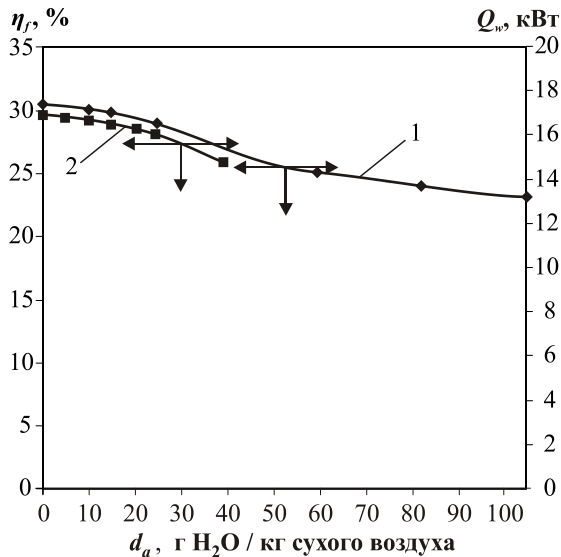
### 3.2. Результаты расчетного анализа и их обсуждение

Проведение CFD-моделирования процесса в условиях КС заданной геометрии при фиксированных режимных условиях позволяет восстановить картину скоростных и концентрационных полей в объеме КС. Температурные распределения удается выявить как в объеме, так и на теплоприемных поверхностях камеры. Соответствующая детализация обеспечивается расчетной сеткой, размерами и формой ячеек.

Проанализируем полученные результаты с установлением основных физико-химических данных по процессам горения, теплообмена и образования токсичных веществ.

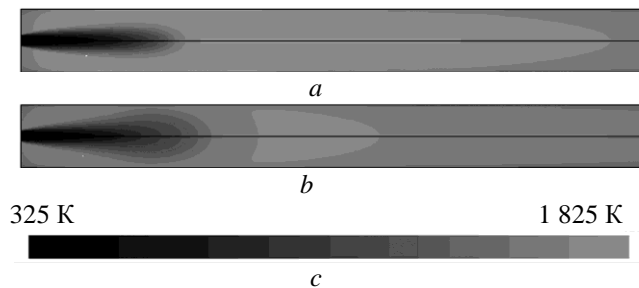
На рис. 3 видно, что увлажнение воздуха горения сопровождается понижением воспринятого стенками КС теплового потока  $Q_w$  и КПД камеры  $\eta_f$ .





**Рис. 3** – Изменение КПД  $\eta_f$ , % и воспринятого теплового потока стенками камеры сгорания  $Q_w$ , кВт, в зависимости от влагосодержания воздуха горения:  $d_a = 105,6$  г/кг сух. воздуха;  $T_w = 1200\text{ K}$ ;  $T_a$ : 1 – 325 K, 2 – 300 K  
**Fig. 3** – Dependence of efficiency  $\eta_f$ , %, and total heat reception by the walls of combustion chamber  $Q_w$ , kW, on the absolute moisture content  $d_a$  of an air-oxidant:  $d_a = 105.6\text{ g/kg dry air}$ ;  $T_w = 1200\text{ K}$ ;  $T_a$ : 1 – 325K, 2 – 300K

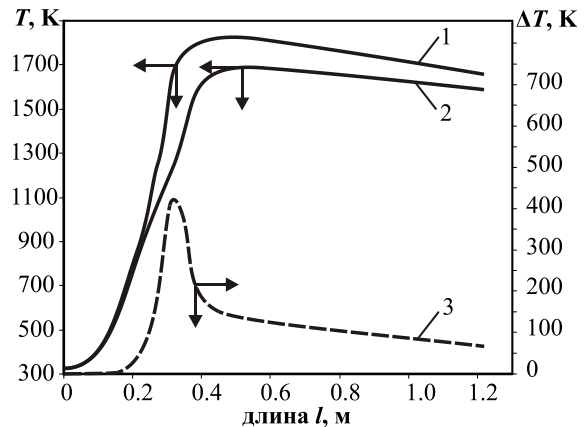
Этот результат обусловлен понижением температур увлажненных продуктов сгорания в объеме и по оси КС (рис. 4 и 5).



**Рис. 4** – Поля температур продуктов сгорания, К, в КС при сжигании метана с сухим воздухом (а) и насыщенным воздухом при  $d_a = 105,6$  г/кг сухого воздуха (b):  $T_w = 1200\text{ K}$ ,  $T_a = 325\text{ K}$  (с – шкала температур продуктов сгорания)  
**Fig. 4** – Pattern of combustion products temperature, K, within combustion chamber by methane burning with a dry air (a) and wet saturated at  $d_a = 105.6$  g/kg.dry air (b):  $T_w = 1200\text{ K}$ ;  $T_a = 325\text{ K}$  (c – temperature scale of combustion products)

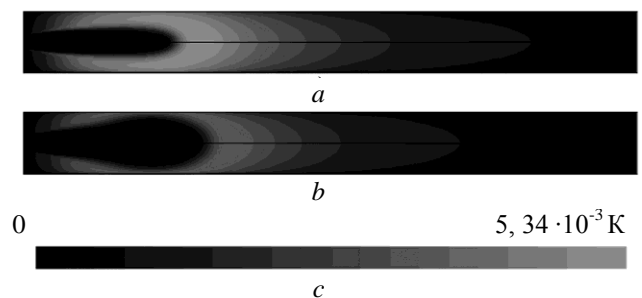
Гидроксил OH (рис. 6) является важнейшим окислительным компонентом образования NO [19], о чем свидетельствует существенная концентрация  $[\text{OH}]_{\text{max}}$  в объеме КС, превышающая  $[\text{O}]_{\text{max}}$  в 2 ÷ 3 раза. Эта локальная концентрация  $[\text{OH}]$  более чем на порядок превышает  $[\text{OH}]_{\text{ex}}$  и на 1 ÷ 2 и более порядков превосходит уровень  $[\text{NO}]$ . Что касается радикала  $\text{HO}_2$ , то его максимальная концентрация на 2 порядка ниже концентрации  $[\text{OH}]_{\text{max}}$ , а  $[\text{HO}_2]_{\text{ex}}$  отлича-

ется от  $[\text{OH}]_{\text{ex}}$  в меньшую сторону еще существеннее (на 3 и более порядков).



**Рис. 5** – Распределение температур продуктов сгорания по оси КС в зависимости от удаления текущего сечения от начального сечения КС: 1 – сухой воздух горения; 2 – насыщенный влажный воздух; 3 – разница локальных осевых температур  $\Delta T$  для условий сжигания 1 и 2 ( $T_a = 325\text{ K}$ )  
**Fig. 5** – The combustion products profiles for local temperatures along the axis of combustion chamber in dependence on distance of the current cross-section from the initial cross-section of combustion chamber (curves 1, 2). State of an air flow: 1 – dry; 2 – wet saturated; 3 – difference of local axial temperatures  $\Delta T$  in arbitrary cross section for conditions 1 and 2 ( $T_a = 325\text{ K}$ )

В связи с этим трудно принять в качестве доказанных фактов суждения некоторых авторов о роли  $\text{HO}_2$  в преобразовании NO [17]. Вместе с тем можно согласиться с выводами работы [19] относительно сомнения в достоверности расчетных моделей образования и роли  $\text{HO}_2$  в протекании реакций в пламени.



**Рис. 6** – Распределение концентраций  $[\text{OH}]$ , молярные доли, в объеме КС при сжигании метановоздушной смеси. Воздух: а – сухой, b – насыщенный  $d_a = 105,6$  г/кг сух. воздуха,  $T_a = 325\text{ K}$  (с – шкала концентраций  $[\text{OH}]$ )  
**Fig. 6** – Pattern of  $[\text{OH}]$  concentration, molar fractions, within the combustion chamber by methane-air mixture burning. An air-oxidant state: a – dry; b – wet saturated,  $d_a = 105.6$  g/kg dry air,  $T_a = 325\text{ K}$  (c – concentration scale  $[\text{OH}]$ )

При этом, в соответствии с данными [20], в случае обедненных смесей относительное сокращение  $[\text{NO}_x]$  при увлажнении будет тем более существенное, чем состав горючей смеси ближе к стехиометрическому ( $\lambda \approx 1,10 \div 1,15$ ).

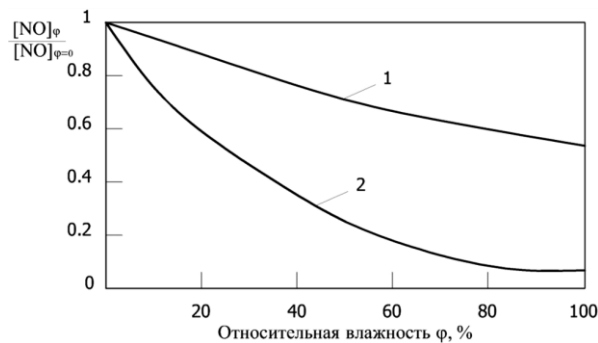


Расчеты [17] подтверждают данные [16, 20] о существенном возрастании  $[NO]$  по мере приближения к  $\lambda \rightarrow 1,0$ : при незначительном понижении  $\lambda$  от 1,15 до 1,05 в случае сухого воздуха-окислителя  $[NO]_{ex}$  возрастает в 1,7 раза. При этом небольшая добавка пара ( $d_a = 20,4$  г/кг сухого воздуха) эту тенденцию сохраняет, меняя лишь абсолютные концентрации  $[NO]$ . Значение  $[NO]_{ex}$  при увлажнении составляет до 20,4 ppm ( $\lambda = 1,15$ ) и 37,3 ppm ( $\lambda = 1,05$ ) соответственно.

Вместе с тем утверждения [16] о возможном достижении  $[CO]$  термодинамически равновесного уровня на срезе камеры сгорания после прохождения максимального значения, о возможности принятия условий частичного и локального равновесия для реакции  $CO + OH \rightleftharpoons CO_2 + H$  и, следовательно, о слабом влиянии увлажнения на  $[CO]$  (за исключением отдельных режимов) исследованиями [18] не подтверждаются.

Таким образом, основным положительным результатом организации процесса влажного горения является улучшение его экологических характеристик благодаря одновременному сокращению образования оксидов азота  $NO$  и углерода  $CO$ . Это обстоятельство используется при организации систем низкоэмиссионного сжигания топлива, где энергетические недостатки топочных камер устраняются путем повышения КПД за счет разнообразных схем утилизации теплоты продуктов сгорания, как правило, комбинирования различных тепловых аппаратов и машин (двигателей).

На рис. 7 по исходным данным рис. 2а представлено изменение концентрации  $[NO]_{\varphi}$  при влажном горении по отношению к  $[NO]_{\varphi=0}$  при сухом горении в зависимости от относительной влажности воздуха горения  $\varphi$ . Каждая из кривых соответствует определенной температуре воздуха горения – 300 К и 325 К, подтверждая в данном случае определяющую роль не собственно температуры воздуха, а его абсолютного влагосодержания  $d_a$  при  $\varphi = \text{const}$ . Несмотря на небольшую разницу температуры воздуха-окислителя (25 К), значения  $d_a$  для состояния насыщения отличаются более чем в 4 раза. Это, в свою очередь, приводит к резкому различию температуры горения смесей газа с насыщенным воздухом при температуре воздуха 300 К и 325 К и, соответственно, к существенному расхождению выходных концентраций  $[NO]_{ex}$  на срезе камеры сгорания.



**Рис. 7** – Зависимость относительной концентрации  $[NO]_{\varphi} / [NO]_{\varphi=0}$  в продуктах сгорания смеси природного газа с воздухом от относительной влажности воздуха горения  $\varphi$ ;  $\lambda = 1,15$ ; исходная температура воздуха горения  $T_a$ , К: 1 – 300; 2 – 325  
**Fig. 7** – Dependence of  $[NO]$  concentration in combustion products of the natural gas (methane) with an air-oxidant on relative moisture of an air flow  $\varphi$  for the case of gas burning with humid air  $[NO]_{\varphi}$  regarding  $[NO]_{\varphi=0}$  when air flow is dry; air excess factor  $\lambda = 1.15$ ; initial combustion air temperature  $T_a$ , К: 1 – 300; 2 – 325

О данном эффекте свидетельствует снижение более чем на порядок  $[NO]$  в факеле газо-воздушной смеси в случае воздуха горения, насыщенного паром при  $T_a = 325$  К, и менее чем двукратное сокращение  $[NO]$  на срезе КС в случае насыщенного воздуха при  $T_a = 300$  К (см. рис. 7).

#### 4. Экспериментальные исследования процесса влажного горения

##### 4.1. Методология исследований факельных процессов с увлажнением воздуха горения. Опытная установка

В Институте газа НАН Украины создана экспериментальная установка по исследованию влияния влажности воздуха-окислителя на выход  $NO_x$  в факеле природного газа, горящем на открытом воздухе (рис. 8).

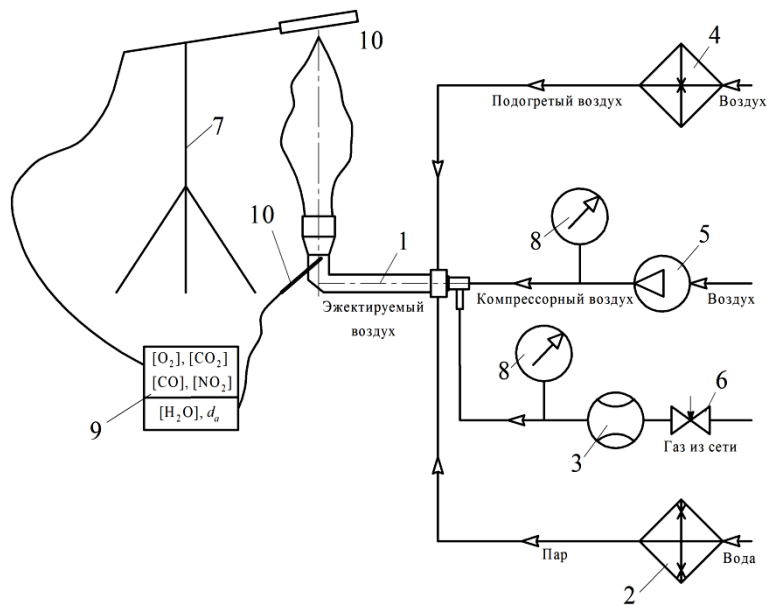
Сжигание подготовленной смеси производится в атмосферном вертикальном факеле, обращенном вверх. Огневой стенд включает узлы генерирования и подачи пара и подогретого воздуха, потоки которых смешиваются в специальном горелочном устройстве со струей горючего газа. Кроме того, в процессе смешивания участвуют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





**Рис. 8** – Внешний вид экспериментальной установки для исследования влияния влаги на процесс сжигания природного газа в открытом факеле  
**Fig. 8** – External view of experimental set-up for investigation an influence of air flow moisture upon the process of natural gas burning in open flame

На рис. 9 оборудование и измерительная аппаратура для исследований.



**Рис. 9** – Принципиальная схема экспериментальной установки:  
 1 – горелка инжекционная; 2 – парогенератор; 3 – ротаметр; 4 – подогреватель воздуха; 5 – компрессор;  
 6 – кран точной регулировки объемного расхода газа; 7 – штатив; 8 – манометр;  
 9 – прибор анализа дымовых газов; 10 – элемент пробоотборника  
**Fig. 9** – Schematic diagram of experimental set-up (firing rig):  
 1– ejector burner; 2 – steam generator; 3 – rotameter; 4 – air flow preheater; 5 – compressor; 6 – fine adjustment value for gas volume flow rate; 7 – rack ; 8 – manometer; 9 – flue gases analyzer; 10 – sensor of sampler

Горелка 1 оснащена стабилизатором горения; парогенератор 2 производства Elenberg (Китай) предназначен для регулирования уровня влажности смеси, к нему подключен трансформатор типа РНО 250 (СССР). Ротаметр типа РМ-6,3 ГУЗ (СССР) 3 используется в качестве расходомера для потока газа после предварительной тарировки на воздухе; подогреватель воздуха 4 – это тепловентилятор ETA 1617, 1500 Вт (Словакия); компрессор 5 произведен FIAC Mecafier B2800/100 CM 2 (Италия). Кран 6 точно регулирует объемный расхода газа, подаваемого на горение; штатив 7 позволяет регулировать положение точки отбора пробы в трех плоскостях. Манометр 8 произведен KromSchröder DMG S2500 (Германия); прибор портативной системы анализа дымовых газов 9 – Testo 350 XL (Германия).

Прибор 9 оснащен 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 помощью комплексные измерения параметров газовой 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 выпускного среза горелочного устройства.

На рис. 10а и 10б в различных ракурсах представлены фотографии размещения пробоотборного устройства и измерительных зондов в исследуемом факеле.



**Рис. 10** – Установка пробоотборного устройства (а) и зондирование открытого факела (б)  
**Fig. 10** – An arrangement of sampler and auxiliary facilities (a) and sounding the open flame (b)

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 выходе из сопла в горелку. Для подачи активных струй горелка снабжена соответствующими коаксиально расположенными соплами. Кроме того, обеспечивается принудительная подача подогретого воздуха и водяного пара на вход смесителя горелки. Таким образом, 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 тепловентилятора; водяного пара от парогенератора. Эти три потока связаны с движением активных струй.

Фиксированные относительные потоки компонентов – горячего воздуха и пара – при изначально задаваемых избыточных давлениях активных потоков  $\Delta p_g$  и  $\Delta p_a$  определяют содержание  $[O_2]$  в газопаровоздушной смеси.

Внутри смесителя горелки подсасывалось примерно 70 % воздуха, необходимого для полного сгорания газа. Сжигание проводилось в вертикальном



атмосферном факеле диаметром  $D_f = 30$  мм (диаметр выходного сечения указанного смесителя).

#### 4.2. Стабилизация горения

Для расширения пределов устойчивой работы горелка снабжена стабилизатором горения, который представляет собой коаксиальный наконечник на выходе из горелки и формирует систему из 20 низкоскоростных факелков – пламен диаметром  $D_s = 5$  мм каждый того же состава, что и основной факел. Благодаря этому расширяется область устойчивого сжигания по нагрузке: расходу топлива, а также потоку газо-воздушной и газо-паровоздушной 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 как бунзеновских пламен (богатые смеси, сжигаемые в первичном конусе и догорающие в диффузионном пламени с окружающим воздухом), так и факелов полностью подготовленных стехиометрических и даже обедненных горючих смесей ( $\lambda \geq 1,0$ ).

### 5. Результаты и их обсуждение

#### 5.1. Огневые испытания по формированию факела

При исследовании горения околостехиометрической смеси ( $\lambda \approx 1,05$ ) использовался сетевой природный газ следующего среднего состава (% 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 (рис. 11),  $\lambda \approx 0,7$ ) использовался природный газ следующего среднего состава (% об.):  $[\text{CH}_4] = 90,17$ ;  $[\text{C}_2\text{H}_6] = 4,87$ ;  $[\text{C}_3\text{H}_8] = 1,04$ ;  $[\text{C}_4\text{H}_{10}] = 0,3$ ;  $[\text{C}_5\text{H}_{12}] = 0,09$ ;  $[\text{C}_6\text{H}_{14}] = 0,1$ ;  $[\text{N}_2] = 1,57$ ;  $[\text{CO}_2] = 1,85$ ;  $[\text{O}_2] = 0,002$ .

В работах [4, 21] указывалось, что варьирование температуры воздушного потока сильно сказывается на его влагосодержании в связи с резким изменением упругости насыщения водяного пара по мере роста температуры атмосферного воздуха. В данных опытах усредненный состав природного газа, получаемого из магистрали, принимался постоянным, что давало возможность варьировать уровень влажности газо-воздушной смеси путем добавления водяного пара в воздушный поток, подаваемый на горение. Кроме того, стало возможным отдельно учесть влияние температуры подогрева газо-воздушной смеси как таковой для случаев, не сопровождаемых влиянием изменения влагосодержания атмосферного воздуха.

Контрольно-измерительная аппаратура на установке позволяет оценить и обеспечить неизменный уровень абсолютного влагосодержания  $d_a$  как для холодной смеси природного газа с воздухом, так и для подогретой. При необходимости исключается оценка влияния степени увлажнения атмосферного

воздуха на уровень выбросов  $[\text{NO}]$  и  $[\text{NO}_x]$ , а учитывается только воздействие температурного фактора.



Рис. 11 – Факел при  $\lambda = 0,7$ ; содержание кислорода в смеси  $[\text{O}_2] = 18,28\%$

Fig. 11 – The flame outer view under primary air excess of  $\lambda = 0,7$ ; oxygen content within the mixture  $[\text{O}_2] = 18,28\%$

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 газо-воздушной смеси уровень  $[\text{NO}]$  выше, чем для холодной при прочих равных условиях.

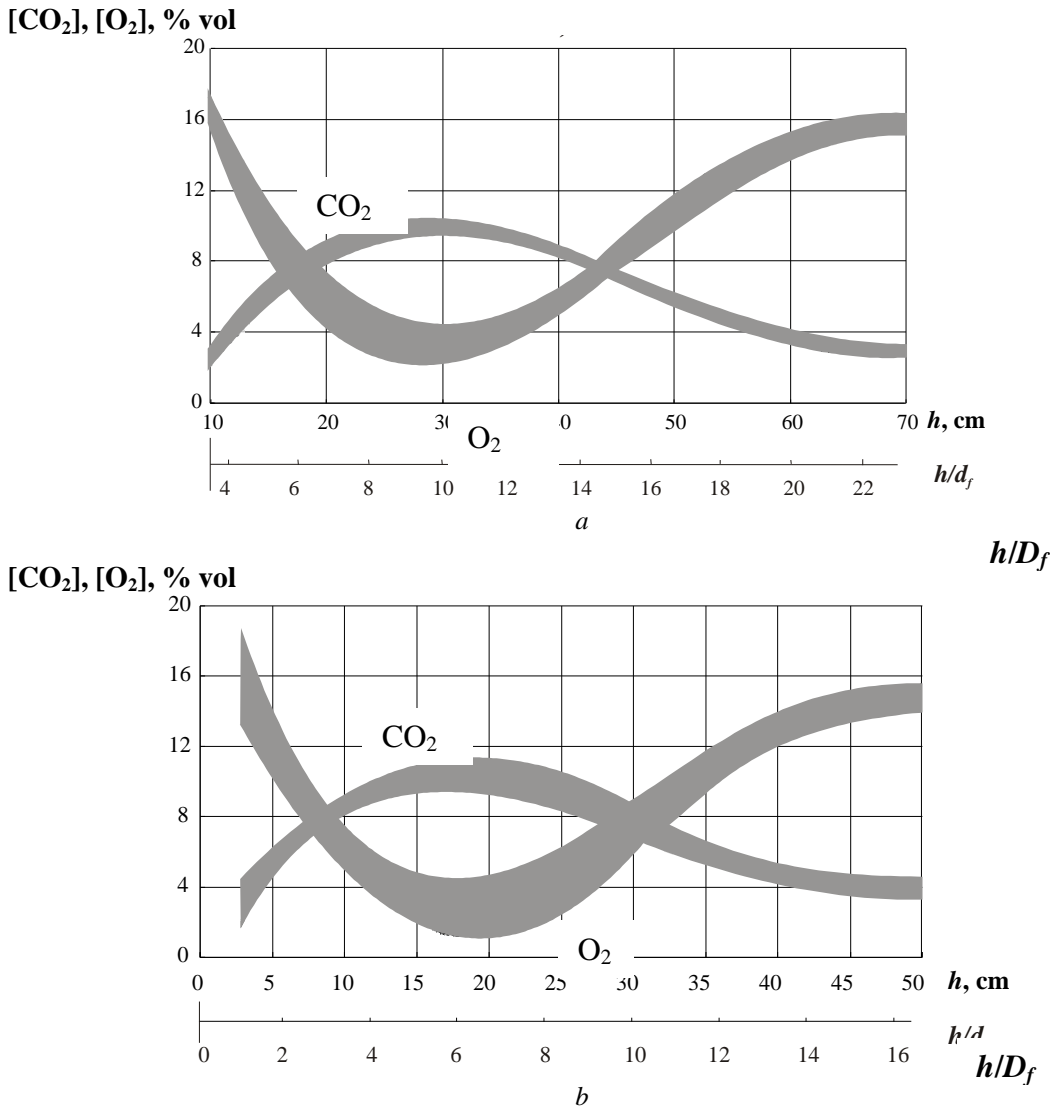
При обобщении данных рассматривались закономерности горения для случаев фиксированных расходов топлива  $\dot{V}_{ng}$ , коэффициентов избытка воздуха-окислителя  $\lambda$  и температуры газо-паровоздушной смеси  $t_{in}$  перед выходом из горелки. Благодаря принятой технике измерения концентраций компонентов с помощью аппаратуры Testo пар в анализируемой пробе конденсируется, а объемные доли компонентов определяются в условно сухой (без влаги) газо-воздушной смеси. По этой причине фиксированное значение  $[\text{O}_2]$  при заданном составе топлива однозначно соответствует  $\lambda$ .

В процессе работы горелки на природном газе отмечалась принципиально различная структура факела при изменении избытка воздуха. В случае богатой горючей смеси ( $\lambda < 1,0$ ;  $\Phi > 1,0$ ) срыв (отрыв)



горения не отмечается, основной – центральный факел диаметром  $D_f = 30$  мм стабилизирован у среза горелки. В связи с этим на начальном участке факела фиксируется потенциальное ядро в виде конуса, внутри которого горение отсутствует, 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. 12а).



**Рис. 12** – Ход выгорания факела вдоль его оси в зависимости от расстояния от среза горелки при влажосодержании исходной газо-воздушной смеси 5–66 г/м<sup>3</sup>: а –  $\lambda_{pr} = 0,7$ ;  $\dot{V}_{ng} = 4$  м<sup>3</sup>/ч;  $t_{in} = 35$ –40 °С; б –  $\lambda = 1,05$ ;  $\dot{V}_{ng} = 4$ –4,5 м<sup>3</sup>/ч;  $t_{in} = 30$ –40 °С.

**Fig. 12** – Dynamics (course) of burn out the flame along an axis in dependence on distance from the burner exit under moisture

content of initial gas-air mixture range of 5–66 g/m<sup>3</sup>: а –  $\lambda_{pr} = 0,7$ ;  $\dot{V}_{ng} = 4$  м<sup>3</sup>/h;  $t_{in} = 35$ –40 °С;

б –  $\lambda_{pr} = 1.05$ ;  $\dot{V}_{ng} = 4$ –4.5 м<sup>3</sup>/h;  $t_{in} = 30$ –40 °С

Длина факела богатой смеси превышает длину факела смеси околостехиометрического состава (рис. 12 а и 12б). 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 справочнике [22]. В этой связи при  $\lambda \approx 1,05$  наблюдается повисание как основного, так и стабилизи-

рующих факелков на расстоянии  $h_l \approx 0,5D_f$  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  $\lambda$  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.

Повисшие пламена имеют у своего основания зону азрации, что обеспечивает подвод к фронту горения дополнительного воздуха, вызывая увеличение  $\lambda$  и, соответственно, возрастание  $u_n$ . На фронте горения наблюдается равенство локальных скоростей смеси и горения, при ламинарном режиме – по отношению к скорости  $u_n$ , организуя стабилизацию факелков на некотором удалении  $h$  от среза горелки.

Влияние увлажнения горючей смеси на устойчивость горения можно качественно оценить по воздействию добавки пара на  $u_n$  рассматриваемых газо-воздушных смесей: чем выше  $u_n$ , тем устойчивее горение. Уменьшение  $u_n$  с ростом содержания пара в горючей смеси свидетельствует о пониженной устойчивости по отношению к отрыву и повисанию факела. В работе [23] показано, что рост  $X_{H_2O}$  от 0 до 0,3 вызывает понижение  $u_n$  метано-кислородно-азотных смесей в 3 ÷ 4 раза, причем это влияние для стехиометрических смесей ( $\lambda = 1,0$ ) оказывается ощутимее, чем для богатых ( $\lambda = 0,66$ ) и бедных ( $\lambda = 1,66$ ) смесей.

Другой характеристикой горения, свидетельствующей об уровне стабилизации горения и устойчивости факела, может служить время задержки воспламенения (самовоспламенения).

В работе [24] представлены и сопоставлены с экспериментальными данными других авторов результаты расчетного анализа влияния наличия влаги в смеси природного газа с воздухом на время задержки самовоспламенения (ADT) в зависимости от влагосодержания  $d_a$  воздуха горения. Значение  $d_a$  представлено через точку росы насыщенного воздуха. Сделан вывод о монотонном возрастании ADT по

мере увеличения влагосодержания  $d_a$  и молярной доли пара  $X_{H_2O}$  в горючей смеси. Рост ADT с повышением  $X_{H_2O}$  – прогрессивно нарастающий, хотя в целом в [24] сделан вывод об умеренном росте ADT в реальной области точек росы влажного воздуха.

Проведенные авторами данной статьи расчетные исследования и сопоставления показали возрастание ADT по мере повышения влажности горючих смесей [24]. Рост ADT свидетельствует о понижении вероятности воспламенения горючих смесей по мере их увлажнения, а также указывает на снижение стабилизирующей способности факела.

В работе [25] имеются указания на изменение 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 пламен  $H_2$  влияние разбавления паром менее выражено и допускает  $\Omega$  до 50% [25].

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

При выгорании 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 разном удалении 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 г/м<sup>3</sup> до 66 г/м<sup>3</sup> (см. рис. 12):

$$h_{[CO_2]_{max}} \approx h_{[O_2]_{min}}.$$

С учетом паросодержания потока исходной горючей смеси уровень варьирования состава соответствует температуре насыщения – точке росы до  $t_{a,dew} \approx 35 \div 45$  °С для влажного воздуха (паровоздушной смеси). Эти значения несколько выше, чем определяемые украинскими климатическими условиями при предельной, указанной выше влажности воздушного потока.

Отмечался экстремальный характер изменения в атмосфере концентраций компонентов продуктов сгорания свободного вертикального факела: с минимумом по  $O_2$  (компонентов исходной смеси и продуктов сгорания в условиях их разбавления в атмо-





сфере) и с максимумом по  $\text{CO}_2$  (компонент продуктов сгорания, образуемый в факеле и постепенно разбавляемый в воздушной атмосфере). По этой же причине содержание  $\text{NO}_x$  вдоль оси факела также проходит через максимум:  $[\text{NO}_x]_{\text{max}} \approx [\text{NO}]_{\text{max}}$ .

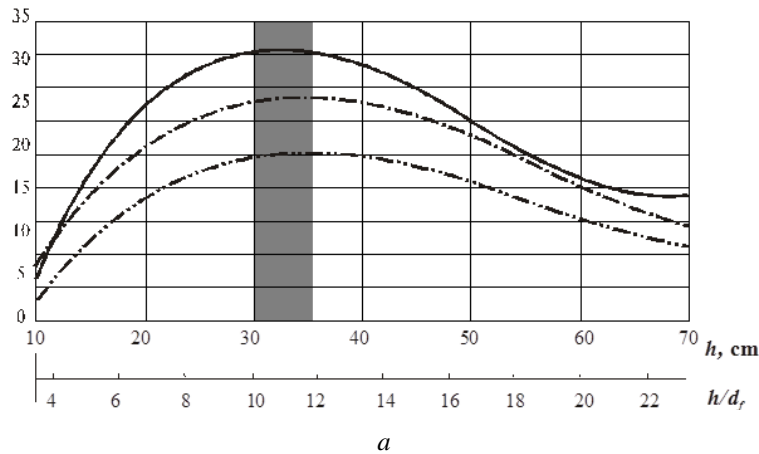
**5.2. Огневые испытания по образованию  $\text{NO}_x$  при горении и вводе водяного пара в исходную смесь**

Оксиды азота с концентрациями  $[\text{NO}_x] = [\text{NO}] + [\text{NO}_2]$  в рассматриваемом факеле представлены практически целиком  $\text{NO}$ :  $[\text{NO}_x] \approx [\text{NO}]$ ;  $[\text{NO}_2] \rightarrow 0$ . Значения  $[\text{NO}_x]_{\text{max}}$  в факеле при прочих равных условиях (тепловая мощность, содержание  $\text{H}_2\text{O}$ ) возрастают при увеличении коэффициента избытка воздуха от  $\lambda \approx 0,7$  до  $\lambda \approx 1,05$ . При измерениях в описываемых опытах установлено, что в пределах факела

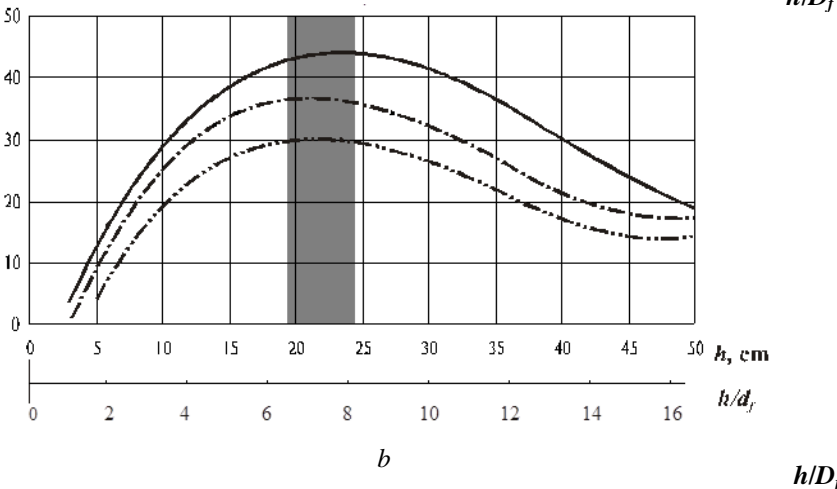
вдоль его оси концентрация  $[\text{NO}]$  проходит через максимум при любом режиме как для богатой, так и для стехиометрической смеси. Характер кривых  $[\text{NO}] = f(l/D_f)$  сохраняется, а значение  $[\text{NO}]_{\text{max}}$  уменьшается с ростом концентрации водяных паров в исходной смеси. Подробный анализ влияния уровня влаги на образование  $\text{NO}$  представлен в настоящем разделе.

Картина изменения  $[\text{NO}]$  в зависимости от расстояния от среза горелки при различном влагосодержании исходной газо-воздушной смеси (рис. 13) также сопровождается достижением некоторых значений  $[\text{NO}]_{\text{max}}$ . Область факела выше сечений, где  $[\text{NO}] \rightarrow [\text{NO}]_{\text{max}}$  на оси, характеризуется постепенным разбавлением смеси и снижением концентрации оксидов азота  $\text{NO}$ .

$[\text{NO}_x]$ , ppm



$[\text{NO}_x]$ , ppm



**Рис. 13** – Концентрация  $[\text{NO}]$  на оси факела в зависимости от расстояния от среза горелки при различном влагосодержании исходной газо-воздушной смеси,  $\text{г/м}^3$ : — 10–15; - - - 30–35; - · - · - 50–60 (область максимальных концентраций  $[\text{NO}]_{\text{max}}$  затемнена);

$a - \lambda_{\text{pr}} = 0,7, \dot{V}_{\text{ng}} = 4 \text{ м}^3/\text{ч}, t_{\text{in}} = 35\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}; b - \lambda = 1,05, \dot{V}_{\text{ng}} = 4\text{--}4,5 \text{ м}^3/\text{ч}, t_{\text{in}} = 30\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$

**Fig.13** –  $[\text{NO}]$  concentration along the flame axis in dependence on distance from the burner exit under moisture content of initial gas-air mixture,  $\text{g/m}^3$ : — 10–15; - - - 30–35; - · - · - 50–60 (region of maximum concentrations  $[\text{NO}]_{\text{max}}$  is darkened);

$a - \lambda_{\text{pr}} = 0,7; \dot{V}_{\text{ng}} = 4 \text{ м}^3/\text{ч}; t_{\text{in}} = 35\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}; b - \lambda_{\text{pr}} = 1,05; \dot{V}_{\text{ng}} = 4\text{--}4,5 \text{ м}^3/\text{ч}; t_{\text{in}} = 30\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}.$



По мере увеличения влажности исходной горючей смеси уровень  $[\text{NO}]$  на оси факела понижается. Изменение локальной концентрации  $[\text{NO}]$  зависит от положения анализируемой точки. При повышении влажности горючей смеси соответственно меняется величина  $[\text{NO}]_{\text{max}}$  в пределах факела. Область локализации участка  $[\text{NO}]_{\text{max}}$  по высоте факела и удаленно  $h$  от среза горелки практически сохраняется при варьировании влажности (см. рис. 13). Область вы-

сот  $h$ , соответствующая положению  $[\text{NO}]_{\text{max}}$ , на рис. 13а и 13б затемнена.

Зависимость  $[\text{NO}]_{\text{max}}$  от влажности горючей смеси показана на рис. 14, которая качественно и количественно подтверждает 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.

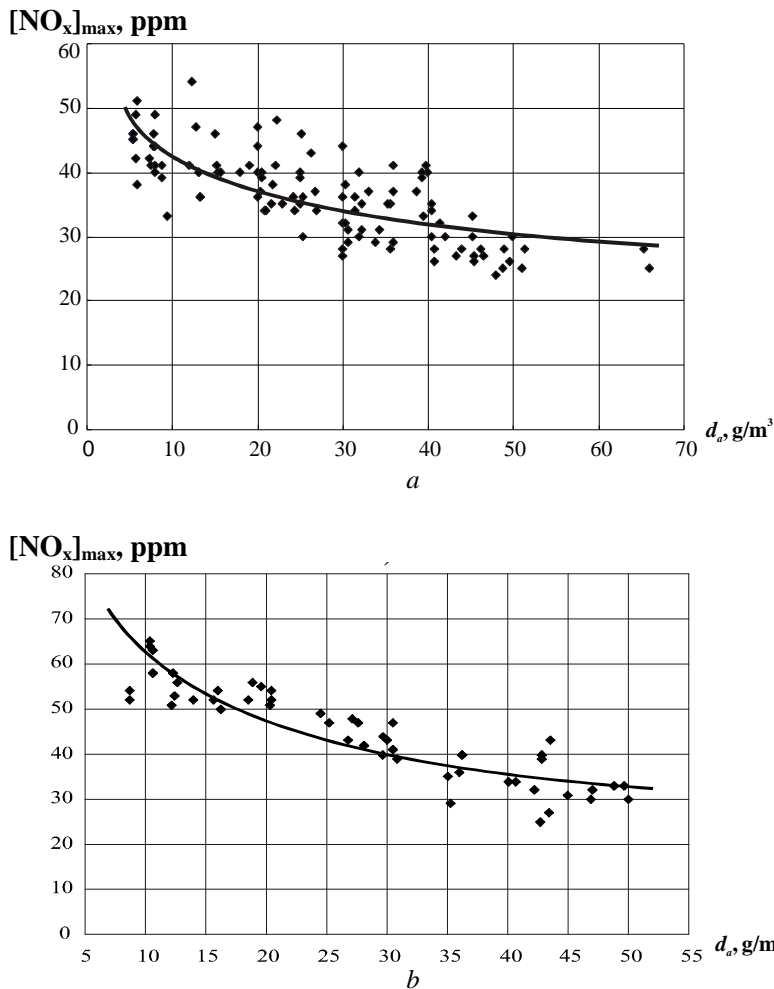


Рис. 14 – Зависимость  $[\text{NO}_x]_{\text{max}}$  на оси факела от абсолютной влажности газо-паровоздушной смеси в контрольной точке

перед срезом горелки: а –  $\lambda_{pr} = 0,7$ ;  $\dot{V}_{ng} = 4 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $t_{in} = 35\text{--}45 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б –  $\lambda = 1,05$ ,  $\dot{V}_{ng} = 4\text{--}4,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $t_{in} = 30\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Fig. 14 – Dependence the  $[\text{NO}_x]_{\text{max}}$  value at the flame axis on absolute humidity of gas-vapour-air mixture in the control burner's point

ahead of burner exit: а –  $\lambda_{pr} = 0,7$ ;  $\dot{V}_{ng} = 4 \text{ м}^3/\text{h}$ ;  $t_{in} = 35\text{--}45 \text{ }^\circ\text{C}$ ; б –  $\lambda_{pr} = 1,05$ ,  $\dot{V}_{ng} = 4\text{--}4,5 \text{ м}^3/\text{h}$ ,  $t_{in} = 30\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$

Результаты экспериментальных исследований (см. рис. 14) в открытом факеле качественно и в определенной степени количественно могут служить задаче верификации данных по сокращению выбросов  $\text{NO}_x$ , полученных путем CFD-моделирования процесса влажного горения в камере сгорания (см. рис. 2). С этой целью сопоставим относительное изменение  $[\text{NO}_x]_{\text{ф}} / [\text{NO}_x]_{\text{ф} = 0} = [\text{NO}_x]_{da} / [\text{NO}_x]_{da = 0}$  при

фиксированной температуре воздуха-окислителя в зависимости от влагосодержания воздуха  $d_a = var$ .

Так, при пятикратном увеличении  $d_a$  от  $10 \text{ г}/\text{м}^3$  (или  $\approx 8 \text{ г}/\text{кг}$  сухого воздуха) до  $50 \text{ г}/\text{м}^3$  ( $\approx 40 \text{ г}/\text{кг}$  сухого воздуха) в опытах получено двукратное сокращение  $[\text{NO}_x]$  (см. рис. 14). По результатам CFD-моделирования сжигания природного газа  $[\text{NO}_x]$  при упомянутом увеличении увлажнения воздуха сокращается в 2,2 раза, то есть относительное различие



расчетных и опытных данных по влиянию влажного горения не превышает 10 % в рассматриваемой области изменения параметров газо-воздушной смеси.

Анализ массива опытных данных, заимствованных из литературы [26, 27] также подтверждает адекватность результатов расчетных исследований, представленных в теоретическом разделе настоящей работы.

На рис. 15 представлены данные, которые обобщают воздействие увлажнения топлива или горючей смеси на образование токсичных веществ: оксидов азота NO (NO<sub>x</sub>) и углерода CO. Данные (рис. 15) по относительному снижению выбросов NO<sub>x</sub> в форме [NO]<sub>φ</sub>/[NO]<sub>φ=0</sub> в двигателях с возвратно-поступательным движением фирмы MAN, работающих с увлажненным воздухом, были получены в разное время.

Характер зависимости [NO<sub>x</sub>] / [NO<sub>x</sub>]<sub>max</sub> от d<sub>a</sub> по опытным данным (см. рис. 15) и результатам CFD-моделирования (см. рис. 2, рис. 7) полностью совпадает, учитывая то, что [NO]<sub>φ=0</sub> = [NO<sub>x</sub>]<sub>max</sub>.

Для проверки соответствия расчетных (см. рис. 2) и опытных (см. рис. 15) данных следует учесть, что значения абсцисс точек [NO]<sub>φ</sub> / [NO<sub>x</sub>]<sub>max</sub>  $\dot{m}_{H_2O} / \dot{m}_f$  по опытным данным (рис. 15) для случая сжигания природного газа при λ = 1,15 должны быть в λΩ<sub>st</sub> = 19 раз меньше, чем d<sub>a</sub> для точек расчетной кривой (см. рис. 2).

Указанное на стр. 104 сокращение на порядок величины [NO<sub>x</sub>] при d<sub>a</sub> = 82,65 г/кг (см. рис. 2) в опытах достигается при  $\dot{m}_{H_2O} / \dot{m}_f \approx 1,4 \div 1,8$ , что в 16 ÷ 21 раз больше упомянутого d<sub>a</sub>. Совпадение расчетных и опытных данных обеспечено.

Рассмотренные выше опытные данные (см. рис. 14), полученные автором данной статьи, для процесса сжигания природного газа с влажным воздухом при значениях содержания пара d<sub>a</sub> = 8г/кг сухого воздуха и d<sub>a</sub> = 40г/кг сухого воздуха соответствуют при пересчете значениям  $\dot{m}_{H_2O} / \dot{m}_f$ , равным 158,2 г H<sub>2</sub>O/кг CH<sub>4</sub> 791,2 г H<sub>2</sub>O/ кг CH<sub>4</sub>. Как показано на рис. 14, увеличение влагосодержания воздуха горения обеспечило 2-кратное сокращение [NO<sub>x</sub>]. В зарубежных исследованиях (см. рис. 15) величины [NO<sub>x</sub>]/[NO<sub>x</sub>]<sub>max</sub> в продуктах сгорания для указанных значений увлажнения горючей смеси понижаются при росте влагосодержания примерно в 2 ÷ 3 раза (с учетом разброса точек на рис. 15).

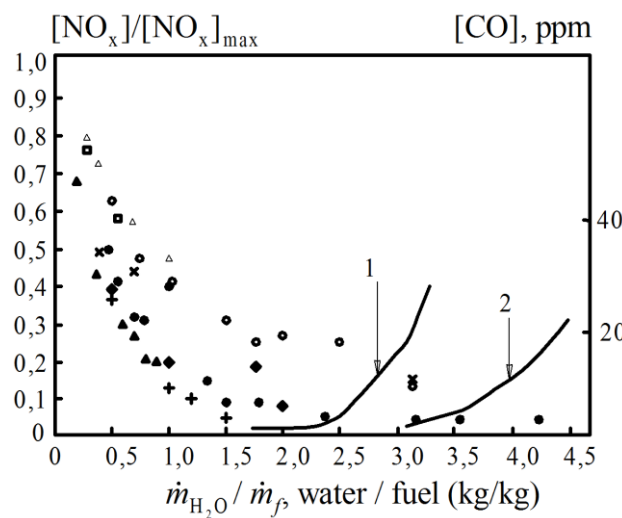
Таким образом, адекватность расчетных моделей и результатов CFD-моделирования при оценке образования NO<sub>x</sub> при влажном горении можно считать доказанной как экспериментами автора данной статьи, так и литературными данными.

## 6. Заключение

В связи с тем, что доля минерального топлива как источника первичной энергии в современном мире, в том числе в ближайшие десятилетия, сохраняется на уровне 80 %, существенно превосходя долю альтернативных видов топлива и возобновляемых источников энергии, проблемы устойчивого развития энергетики напрямую увязываются с использованием органического топлива, процессами его сжигания.

Особую роль играет наличие пара в атмосферном воздухе, выступающем окислителем в процессах горения, последствия которых сильно зависят от локальных температурно-влажностных условий отдельных регионов.

Проблема изменения глобального климата, его потепления, которую связывают с карбоновым (в пересчете на CO<sub>2</sub>) загрязнением, не является однозначной в силу более выраженной для парникового эффекта роли H<sub>2</sub>O в атмосфере (как селективно по-



**Рис. 15** – Зависимость относительного сокращения выбросов оксидов азота [NO<sub>x</sub>]/[NO<sub>x</sub>]<sub>max</sub> и концентрации оксидов углерода [CO], ppm, от степени увлажнения потока горючей смеси – соотношения массовых потоков влаги и топлива  $\dot{m}_{H_2O} / \dot{m}_f$ . Рост [CO] определяет зону риска (восходящие кривые CO); «зона риска»: 1 – для газовых турбин; 2 – для аппаратов WVP (паровой насос) [26, 27]

**Fig. 15** – Dependence of relative reduction the nitrogen oxides [NO<sub>x</sub>]/[NO<sub>x</sub>]<sub>max</sub> and carbon oxides concentration [CO], ppm, on burning mixture humidification – ratio of mass flows of vapor to fuel  $\dot{m}_{H_2O} / \dot{m}_f$ . Risk of [CO] formation by increase of water vapour content for gas turbine combustion chamber (1) and by water vapour pump (WVP) using (2) [26,27]

В качестве варьируемого фактора на рис. 15 использовано относительное влагосодержание горючей смеси, которое представлено в виде отношения массовых потоков пара и топлива  $\dot{m}_{H_2O} / \dot{m}_f$ , связанного с влагосодержанием воздуха горения d<sub>a</sub>:

$$d_a = \dot{m}_{H_2O} / \dot{m}_a = \dot{m}_{H_2O} / \lambda \dot{m}_f \Omega_{st},$$

где Ω – соотношение потоков «окислитель (воздух): топливо», массовое.



глошающе-излучающего газа), а также наличия множества источников  $\text{CO}_2$  на планете.

В первой половине XXI столетия сохранится тенденция увеличения по абсолютному объему добычи и потребления в мире углеводородных видов топлива, учитывая прогнозы международных энергетических центров (IIASA, Вена) и мировых агентств (US Energy Information Administration, EIA).

С целью минимизации экологических последствий сжигания природного газа при сохранении или повышении энергетической эффективности и КПД использования топлива получают распространение процессы влажного горения в сочетании с различными схемами утилизации теплоты уходящих продуктов сгорания.

В результате теоретического анализа процесса «влажного» горения по данным CFD-моделирования прямоточной камеры сгорания при подаче метано-воздушной смеси в условиях подогрева и сопутствующего увлажнения атмосферного воздуха установлено, что ввод  $\text{H}_2\text{O}$  положительно воздействует на экологические характеристики продуктов сгорания как теплоносителя (рабочего тела при выработке энергии) и понижает их энергетический потенциал.

В указанных случаях прилагаются дополнительные усилия по утилизации располагаемой теплоты продуктов влажного горения и созданию комбинированных установок, включая организацию парогазового цикла. На современном этапе развития энергетики обеспечивается достижение КПД соответствующих установок, превышающего 60 %.

Несмотря на известный факт возрастания выхода  $[\text{NO}]$  ( $[\text{NO}_x]$ ) по мере подогрева воздуха горения в случае сухого окислителя, при использовании влажного атмосферного воздуха наличие пара существенно меняет основные закономерности изменения выхода токсичных веществ: оксидов азота  $\text{NO}$  ( $\text{NO}_x$ ), а также углерода  $\text{CO}$  в продуктах сгорания по мере увлажнения воздуха горения и приближения воздуха к состоянию насыщения.

Рост абсолютного влагосодержания атмосферного воздуха  $d_a$  вызывает понижение  $[\text{NO}]$  в факеле. Следствием этого является необычный факт: в случае фиксированной относительной влажности выбросы  $\text{NO}$  при подогреве воздуха горения сокращаются. Максимальное сокращение  $[\text{NO}]$  на выходе из топочной камеры по этой причине соответствует состоянию насыщения (относительной влажности  $\varphi = 100\%$ ) при данной температуре воздуха  $T_a$ . Доказано, что при  $T_a = 325\text{ K}$   $[\text{NO}]$  в условиях влажного горения может быть уменьшено более чем на порядок при одновременном почти 2-кратном сокращении концентрации  $[\text{CO}]$  по сравнению с использованием сухого воздуха.

Влияние увлажнения атмосферного воздуха на образование  $\text{NO}_x$  в открытом факеле природного газа исследовано на экспериментальной установке, разработанной автором в Институте газа НАН Украины. Обработка экспериментальных данных в зависи-

мости от абсолютного влагосодержания воздуха с помощью CFD-моделирования подтвердила качественно и количественно возможность существенного снижения выбросов  $\text{NO}_x$  при влажном горении. Найденные зависимости подтверждаются путем сравнением расчетных и опытных данных с накопленными в литературе результатами по снижению выбросов  $\text{NO}_x$  при сжигании углеводородов в различных технических устройствах в случае увлажнения горючей смеси.

### Список литературы

[1] Annual energy outlook. August 2016. US Energy Information Administration [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.eta.gov/forecasts/deo](http://www.eta.gov/forecasts/deo) – (Дата обращения: 16.03.2018).

[2] Guillet, R. Porous Exchanger and Water Vapor Pump the Altarex Boiler / R. Guillet // 1995 International Gas Research Conference; Proceedings; Cannes, France, 6–9 November, 1995, Dan A. Dolenc, editor. Volume II. Rockville, MD, Government Institutes, Inc., 1996. – P. 2783–2792.

[3] Beneke, F. Klimaziele und ihre Auswirkungen auf die Thermoprozessindustrie / F. Beneke. – Processwärme – Thermoprozess-technik. Wärme – behandlung, Anlagenbau und – betrieb. – 2018. – No. 1 – P. 41–42.

[4] Сорока, Б.С. Влияние климатических факторов на теплотехнические характеристики, энергетическую эффективность и оценка экологических последствий сжигания газового топлива / Б.С. Сорока // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE) . – 2017. – № 4–6. – С. 116–129.

[5] Ambient Condition Effects on  $\text{NO}_x$  and  $\text{CO}$  emissions from process heaters / 2008, ASME Intern. Mechanical Engineering Conference, November 2–6, 2008, Boston, Mass., USA, IMECE 2008 – 68284. – 112 p.

[6] Overview of Greenhouse Gases / Greenhouse Gas Emissions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.epa.gov/ghgemissions...> – (Дата обращения: 22.03.2018).

[7] Humid Air Motor Technology for green profits. – MAN Prime Serv [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.mandieselturbo.2018](http://www.mandieselturbo.2018). – 7 p. – (Дата обращения: 23.03.2018).

[8] Пыль пустыни – и во вред, и во благо / По 115 Атериялам журнала «Prevention Magazine» (USA) “2000” (Еженедельник). – 2018. – № 8 (855). – С4.

[9] Nakicenovic, N. SDEWES 2014. 1056 Achieving Sustainable Development Goals (Sdg) Including Energy for All within Planetary Boundaries in Sustainable Development of Energy. – Water and Environment Systems. – 2015. – P. 61–62.

[10] Jaffe, A.M. Green Giant. Renewable Energy and Chinese Power [Электронный ресурс] / Foreign Affairs, March / April 2018 Issue. – Режим доступа:



<https://www.foreignaffairs.com/articles/china/2018-02-13/green-giant> – (Дата обращения: 27.03.2018).

[11] Rooney, T. Carbon Everywhere But What About the Water / T. Rooney // *Renewable Energy World*. – 2010. – Jan.11. – P. 1–6.

[12] Altfeld, K. Entwicklung der Erdgas – beschaffenheiten in Europa / K. Altfeld, P. Schley // *Gaswärme Int.* – 2012. – No. 2. – P. 57–63.

[13] Leicher, J. et al. Gasbeschaffensänderungen: Lösungsansätze für industrielle Feuerungsprozesse / J. Leicher [et al.] // *Gaswärme Int.* – 2013. – No. 6. – P. 43–56.

[14] Altfeld, K. Admissible hydrogen concentrations in natural gas systems / K. Altfeld, D. Pinchbeck // *Gas for energy*. – 2013. – No. 3. – P. 1–12.

[15] Бондаренко, Б.И. Межфазный углеродообмен: термодинамика и процессы переноса (Монография) / Б.И. Бондаренко, Б.С. Сорока, В.К. Безуглый. – Киев НВП «Наукова думка», 2013. – 223 с..

[16] Боумен, К.Т. Кинетика образования и разложения загрязняющих веществ при горении. В книге: Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени: Пер. с англ. / Ред. Чигир Н.А. – М.: Машиностроение, 1981. – С. 59–83.

[17] Сорока, Б.С. Низкоэмиссионное сжигание подготовленных газо – воздушных смесей в камере с рециркуляцией продуктов сгорания / Б.С. Сорока, В.А. Згурский, М. Хинкис // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. – 2013. – № 1 (12). – С. 368–374.

[18] Szewczyk, D. High Temperature Burners (HTB) as the result of the connection of HiTAC combustion technology with central recuperative systems / D. Szewczyk, J. Engdahl, A. Stachowski // *Proceedings: 8<sup>th</sup> International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification*. Poznan, Poland, 2010. – P. 337–345.

[19] Kazakov A., Frenklach M. Natural gas reduced combustion mechanism [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.me.berkeley.edu/drm/> – (Дата обращения: 02.04.2018).

[20] Hermann, F. Computational and Experimental Investigation of Emissions in a Highly Humidified Premixed Flame / F. Hermann, J. Klingmann, R. Gabrielsson // *Proceedings of 2003 ASME Turbo Power for Land, Sea & Air*. – Atlanta, Georgia, US, 2003. – GT 2003–38337.

[21] Сорока Б.С., Горупа В.В. Анализ процесса конденсации водяного пара газовых атмосфер и продуктов сгорания / Б.С. Сорока, В.В. Горупа // *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. – 2017. – № 1. – С. 3–15.

[22] Брюханов, О.Н. Аэродинамика, горение и теплообмен при сжигании топлива: Справочное пособие / О.Н. Брюханов, Б.С. Матрюков. – СПб: Недра, 1994. – 317 с.

[23] Soroka, B. Development of Computation Techniques and Data Generalization on Burning Velocity of Dry and Humidified Inflammable Gas Fuel-Oxidant Mixtures / B. Soroka, V. Zgurskiy, N. Vorobyov // *International Journal of Energy for a Clean Environment*.

(IJECE). – 2011. – Vol. 12. – No. 2–4. – P. 187–208.

[24] Soroka, B. Preventing autoignition inside the burner with high-temperature oxidant preheating / B. Soroka [et al.] // *International Journal of Energy for a Clean Environment*. – 2017. – Vol. 18(2). – P.113–122.

[25] Göke, S. Influence of Steam Dilution on NO<sub>x</sub> Formation in Premixed Natural Gas and Hydrogen Flames / S. Göke, C.O. Paschereit. – Copyring 2012 by S. Göke. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. (AIAA) with permission. AIAA – 15 p.

[26] Bogdanova V., Moreau J. Guillet R. The water vapor pump technologies back in France. CIEC, 2014, June. – 4 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ciec.fr/wp-content/themes/ciec/assets/fichier/english-pave.pdf>. – (Дата обращения: 05.04.2018).

[27] 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. – No. 12 (2–4). – P. 259 – 271.

## References

[1] Annual energy outlook. August 2016. US Energy Information Administration [E-resource]. Available on: [www.eta.gov/forecasts/deo](http://www.eta.gov/forecasts/deo) (03.16.2018).

[2] Guillet R. Porous Exchanger and Water Vapor Pump the Altarex Boiler. *1995 International Gas Research Conference; Proceedings*; Cannes, France, 6–9 November, 1995; Dan A. Dolenc, editor. Volume II. Rockville, MD, Government Institutes, Inc., 1996; pp. 2783–2792.

[3] Beneke F. Klimaziele und ihre Auswirkungen auf die Thermoprozessindustrie. *Processwärme – Thermoprocесstechnik. Wärme – behandlung, Anlagenbau und – betrieb*, 2018;(1):41–42.

[4] Soroka B.S. Climate factors influence over heat engineering characteristics energy efficiency and evaluation of environmental consequences of gas fuel combustion (Vlijanje klimaticeskikh factorov na teplotehnickeskiye karakteristiki energeticheskuyu efekktivnisty I otsenka ekologicheskikh posledstviy szhiganiya gazogo topliva), *International Scientific Journal for Alternative Energy and ecology (ISJAE)*, 2017;4–6:116–129 (in Russ.).

[5] Ambient Condition Effects on NO<sub>x</sub> and CO emissions from process heaters / 2008, ASME Intern. Mechanical Engineering Conference, November 2–6, 2008, Boston, Mass., USA, IMECE 2008 – 68284. – 112 p.

[6] Overview of Greenhouse Gases / *Greenhouse Gas Emissions* [E-resource]. Available on: <http://www.epa.gov/ghgemissions...> (03.22.2018).

[7] Humid Air Motor Technology for green profits. – MAN Prime Serv [E-resource]. Available on: [www.mandiesel turbo.2018](http://www.mandiesel turbo.2018). – 7 p. (03.23.2018).



- [8] The desert dust – to harm and to good // The Generalization materials of the “Provention Magazine” (Pyl’ pustyni – I vo vred, I vo blago / Po materialam zhurnala “Zhurnal profilaktiki” (SSHA) “2000” (Yezhenedel’nik), 20188 (855), 23.II. / Aspekty. – S4 (in Russ.).
- [9] Nakicenovic, N. SDEWES 2014.1056 Achieving Sustainable Development Goals (Sdg) Including Energy for All within Planetary Boundaries in Sustainable Development of Energy. Water and Environment Systems, 2015; pp. 61–62.
- [10] Jaffe A.M. Green Giant. Renewable Energy and Chinese Power [E-resource]. / Foreign Affairs, March / April 2018 Issue. – Available on: <https://www.foreignaffairs.com/articles/china/2018-02-13/green-giant> (03.27.2018)
- [11] Rooney T. Carbon Everywhere but What about the Water. *Renewable Energy World*, 2010; Jan.11:1–6.
- [12] Altfeld K., Schley P. Entwicklung der Erdgas – beschaffenheiten in Europa. *Gaswärme Int.*, 2012;2:57–63.
- [13] Leicher J. et al. Gasbeschaffenheitsänderungen: Lösungsansätze für industrielle Feuerungsprozesse. *Gaswärme Int.*, 2013;6:43–56.
- [14] Altfeld K., Pinchbeck D. Admissible hydrogen concentrations in natural gas systems. *Gas for energy*, 2013;3:1–12.
- [15] Bondarenko B.I., Soroka B.S., Bezuglyy V.K. Carbon interphase exchange thermodynamics and transfer processes (Mezhfaznyy ugleorodobmen: termodinamika I protsessy perenosa: Monografiya). Kiyv: NVP “Naukova dumka” Publ., 2013; 223 p. (in Russ.).
- [16] Boumen K.T. The kinetics of formation and decomposition of pollutants under combustion. In: The formation and decomposition of pollutants in the flame (Kinetyka obrazovaniya I rozlozheniya zagryaznyayushchikh veshchestv pri gorenii. V knize: Obrazovaniye I rozlozheniye zagryaznyayushchikh veshchestv v plameni: Per. s angl. / Red. Chigir N.A. Moscow: Mashinostroeniye Publ., 1981; pp. 59 – 83 (in Russ.).
- [17] Soroka B.S., Zgurskiy V.A., Khinkis M. Low-emission burning of premixed gas-air mixtures in the chamber by combustion products recirculation (Nizkoemissionnoye szhiganiye podgotovlennykh gazovykh smesey v kamere s retsirkulyatsiyey produktov sgoraniya). *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul’taty, tekhnologii*, 2013;1(12):368–374 (in Russ.).
- [18] Szewczyk, D. High Temperature Burners (HTB) as the result of the connection of HiTAC combustion technology with central recuperative systems / D. Szewczyk, J. Engdahl, A. Stachowski // Proceedings: 8<sup>th</sup> International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification. Poznan, Poland, 2010; pp. 337–345.
- [19] Kazakov A., Frenklach M. Natural gas reduced Combustion mechanism [E-resource]. Available on: <http://www.me.berkeley.edu/drm/> (04.02.2018).
- [20] Hermann F., Klingmann J., Gabrielsson R. Computational and Experimental Investigation of Emissions in a Highly Humidified Premixed Flame. *Proceedings of 2003 ASME Turbo Power for Land, Sea & Air*. Atlanta, Georgia, US, 2003; GT 2003–38337.
- [21] Soroka B.S., Horupa V.V. Analysis of the Process of Water Vapor Condensation within Gas Atmospheres and Combustion Products. *Energy Technologies and Resource saving*, 2017;1: 3–19 (in Russ.).
- [22] Bruhanov O.N., Mastrukov B.S. Fluid dynamics, combustion and heat transfer under fuel burning (Aerodynamika, gorenie I teploobmen pri szhiganiye topliva: Spravochnoe posobie). St. Petersburg: Nedra Publ., 1994; 317 p. (in Russ.).
- [23] Soroka B., Zgurskiy V., Vorobyov N. Development of Computation Techniques and Data Generalization on Burning Velocity of Dry and Humidified Inflammable Gas Fuel-Oxidant Mixtures. *International Journal of Energy for a Clean Environment (IJECE)*, 2011;12(2–4):187–208.
- [24] Soroka B. et al. Preventing autoignition inside the burner with high-temperature oxidant preheating. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2017;18(2):113–122.
- [25] Göke S., Paschereit C.O. Influence of Steam Dilution on NO<sub>x</sub> Formation in Premixed Natural Gas and Hydrogen Flames. – Copyring 2012 by S. Göke. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. (AIAA) with permission. AIAA; 15 p.
- [26] Bogdanova V., Moreau J. Guillet R. The water vapor pump technologies back in France. CIEC, 2014, June; 4 p. [E-resource]. Available on: <https://www.ciec.fr/wp-content/themes/ciec/assets/fichier/english-pave.pdf>. – (04.05.2018).
- [27] 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):259–271.

Транслитерация по BSI

