

## Топливо и энергетика

УДК 621.1.013(045)

**Сорока Б.С., докт. техн. наук, проф., Горупа В.В.****Институт газа НАН Украины, Киев**

ул. Десятаревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: boris.soroka@gmail.com

### Анализ процесса конденсации водяного пара в газовых атмосферах и продуктах сгорания

Водяной пар — важнейшее рабочее тело в процессах генерирования и преобразования энергии. Содержание  $H_2O$  в газах и газовых смесях служит мерой их осушки в технологических процессах. Наличие пара в воздухе-окислителе обеспечивает снижение образования вредных веществ при горении. Для оценки приближения влажной газовой системы (воздуха, газовых смесей или продуктов сгорания) к состоянию конденсации используются температуры, характеризующие состояние насыщения: точка росы  $t_{dew}$  и температура мокрого термометра  $t_{wb}$ . Установлены значения этих параметров для влажного воздуха в зависимости от базовой температуры и относительной влажности воздуха. Чем ниже значения температур  $t_{dew}$ ,  $t_{wb}$ , тем шире область существования  $H_2O$  в паровой фазе. К числу газовых топлив, по классификации EUROSTAT, относятся природный газ (NG), доменный газ (BFG), коксовый газ (COG). Проведены расчеты зависимости точки росы продуктов сгорания NG, COG, BFG от характеристик воздуха горения: коэффициента избытка окислителя  $\lambda$ , температуры  $t_a$  и относительной влажности  $\phi_a$ . Установлена точка росы  $t_{dew}$  для продуктов сгорания перечисленных газовых топлив при стандартных условиях, которые представлены стехиометрическими ( $\lambda = 1,0$ ) смесями с сухим воздухом: чистого метана, NG, COG, BFG — соответственно 59,3; 58,5; 11,1; 61,5. В случае влажного насыщенного воздуха при температуре 25 °С точка росы для продуктов сгорания представленных топлив соответственно равна 62,0; 61,5; 25,6; 64,0 °С. Найдены доли  $H_2O$  в паровой и жидкой фазах продуктов сгорания природного газа в зависимости от температуры при условии, что 100 %-е содержание  $H_2O$  в виде пара (без жидкой фазы) соответствует температуре насыщения (точке росы) продуктов сгорания, которая составляет при стехиометрическом соотношении «воздух : газ» около 60 °С. *Библ. 31, рис. 10, табл. 3.*

**Ключевые слова:** атмосферный воздух горения (окислитель), влагосодержание продуктов сгорания, абсолютная влажность воздуха, относительная влажность воздуха, доменный газ, коксовый газ, продукты сгорания, природный газ, температура мокрого термометра, точка росы.

Водяной пар — важнейшее рабочее тело в процессах генерирования и преобразования энергии, а также существенный компонент про-

дуктов сгорания углеводородных топлив. Процессы конденсации водяного пара в продуктах сгорания осуществляются в топливоиспользую-

щих установках для повышения их энергетической эффективности. Увлажнение исходной горючей смеси и прежде всего воздуха-окислителя в различных схемах имеет целью улучшение экологических характеристик топочных систем благодаря снижению  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ , а также  $\text{CO}_2$  как парникового газа [1].

В связи с распространением систем сжигания топлива с увлажненным воздухом-окислителем, а также необходимостью учета при использовании топлив влагосодержания атмосферного воздуха, отличающегося по отдельным регионам Земли, особое значение приобретает оценка влияния характеристик компонентов горения (топлива, воздуха-окислителя) на точку росы продуктов сгорания. С этих позиций в настоящей работе выполнен систематический анализ указанного аспекта использования природного газа (NG), а также сопутствующих вторичных топлив, производимых в отдельных технологиях или утилизируемых в различных технологиях (derived (or recovered) gases), по классификации EUROSTAT [2]: коксового (COG) и доменного (BFG) газов.

Украина в 2016 г. использовала 33,2 млрд  $\text{м}^3$  природного газа, что на 4 % меньше, чем в предыдущем году. При этом две трети топлива — газ собственной добычи; его использовано 20,2 млрд  $\text{м}^3$ . Еще 11,1 млрд  $\text{м}^3$  было закуплено за границей: в Словении — 9,1 млрд  $\text{м}^3$  и по 1,0 млрд  $\text{м}^3$  в Венгрии и Польше [3]. В связи с многообразием источников поставки и составов европейских природных газов, свойства NG в украинских сетях могут меняться по территории страны и во времени.

В условиях диверсификации используемых топлив, в том числе природного газа различного происхождения, большое значение приобретает выбор, определение и системное представление набора характеристик основных газовых топлив. Важнейшие требования при этом — должная номенклатура технических характеристик, достаточная для потребителей, и четко оговоренные их значения.

В настоящее время в Украине готовится «Технический регламент» на природный газ, при составлении которого предполагается учесть украинский и зарубежный опыт и нормативные значения параметров газа, характеризующих состояние NG на разных этапах его перемещения — от хранения и подготовки к транспортировке в магистральных газопроводах до использования в промышленности, коммунально-бытовом секторе, а также при компримировании для ДВС.

Природный газ не является единственным видом газового топлива, используемого в мире и в Украине, в частности.

Украина является наибольшим в Европе производителем и потребителем технологических газов (manufactured and recovered gases), с их общим использованием 285500 ТДж (терраджоуль —  $10^{12}$  Дж) в 2012 г. [2]. Основными газами этой группы являются доменный и коксовый газы. Последний содержит до 60 %  $\text{H}_2$ , что обеспечивает минимизацию выбросов  $\text{CO}_2$  как основного парникового газа. Поскольку при сжигании доменного газа образование оксидов азота минимально, то возможны выбор и оптимизация состава коксо-доменного газа (выбор смеси BFG и COG) по минимуму вредных выбросов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_x$ ).

BFG, COG и их смеси относятся к числу печных топлив, а также используются для выработки электричества и теплоты в когенерационных установках (СНП). По информации комбината «Запорожсталь», коксовый и доменный газы поступают в сети влажными, в состоянии 100 %-го насыщения. Предусмотрен отвод конденсата из линии смешанного газа.

Таким образом,  $\text{H}_2\text{O}$  может участвовать в процессах использования топлива и его сжигания, поступая в топочные системы с топливом, окислителем (то есть в составе горючей смеси как исходных компонентов), а также при образовании пара в результате химических реакций горения. При этом точки росы газовых топлив и точки росы продуктов сгорания относятся к числу важных характеристик любой топочной системы, значение которых должны регламентироваться нормативами.

#### **Конденсация водяного пара в газах и газовых смесях**

Конденсация, как и обратный ей процесс испарения, относится к числу фазовых переходов I рода. Дождь, снег, роса, иней — следствие конденсации водяного пара в атмосфере. Водяной пар генерируется и за счет испарения  $\text{H}_2\text{O}$ , и за счет сжигания водородсодержащих топлив. Таким образом, в процессах сжигания топлив водяной пар может появляться в продуктах сгорания из-за влагосодержания топлива и окислителя, а также за счет собственно химической реакции горения.

Кроме энергетических характеристик фазовых переходов, определяемых с привлечением методов равновесной химической термодинамики и значений термодинамических свойств индивидуальных веществ [4], вероятность процес-

имуществами систем конденсации невозможно. Учитывая переменные во времени параметры воздуха горения ( $t_a, \phi_a$ ), на рис.9 можно определить область предпочтительных температур  $t_{ex}$  для работы котлов на различных топливах.

При понижении температуры влажной газовой смеси при  $d = \text{const}$  увеличивается относительная влажность, а при достижении  $\phi_{CP} =$

$= 100\%$  фиксируется температура насыщения, ниже которой происходит конденсация паров  $H_2O$ . В результате доля  $H_2O$  в жидкой фазе возрастает, а в газовой сокращается (рис.10).

Общее содержание  $[H_2O]_{\Sigma} = [H_2O]_{\text{cond}} + [H_2O]_v$ :

$$\begin{aligned} m_{H_2O}/m_{\text{mix}} &= \tilde{K} = \\ &= (n_{H_2O}/n_{\text{mix}}) (M_{H_2O}/M_{\text{mix}}). \end{aligned} \quad (28)$$

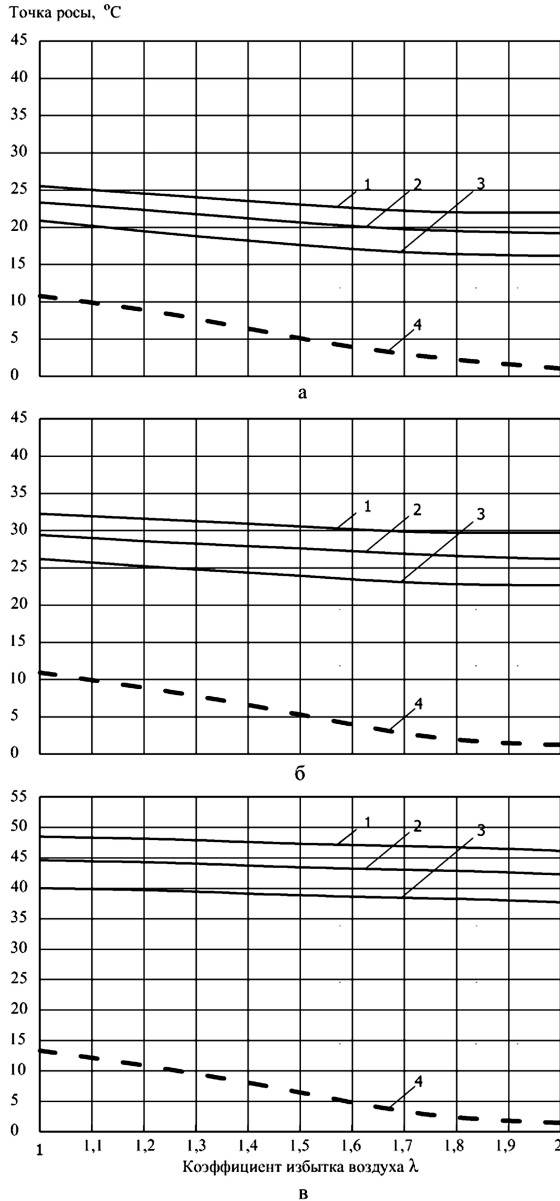


Рис.6. Зависимость точки росы продуктов сгорания  $t_{\text{dew}}$  от коэффициента избытка воздуха горения  $\lambda$  с разными исходными температурами  $t_a, ^\circ\text{C}$  ( $T_a, \text{K}$ ): а – 25 (298); б – 35 (308); в – 55 (328); относительная влажность атмосферного воздуха-окислителя  $\phi_a, \%$ : 1 – 100 (влажный насыщенный воздух); 2 – 80; 3 – 60; 4 – 0 (сухой воздух). Топливо – сухой доменный газ (см. табл.2).

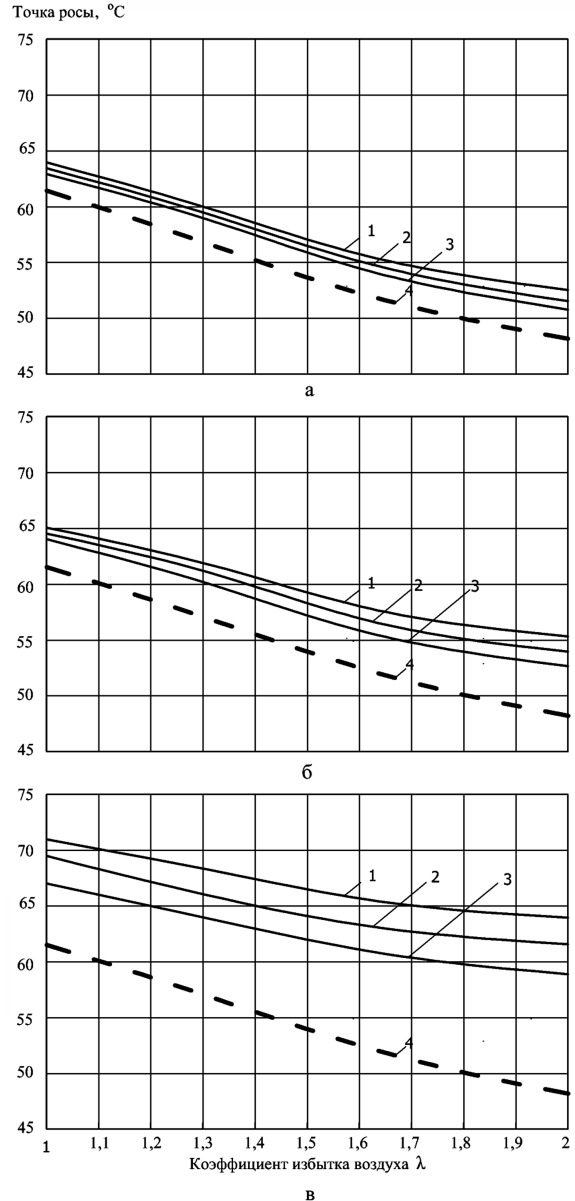


Рис.7. Зависимость точки росы продуктов сгорания  $t_{\text{dew}}$  от коэффициента избытка воздуха горения  $\lambda$  с разными исходными температурами  $t_a, ^\circ\text{C}$  ( $T_a, \text{K}$ ): а – 25 (298); б – 35 (308); в – 55 (328); относительная влажность атмосферного воздуха-окислителя  $\phi_a, \%$ : 1 – 100 (влажный насыщенный воздух); 2 – 80; 3 – 60; 4 – 0 (сухой воздух). Топливо – сухой коксовый газ (см. табл.2).

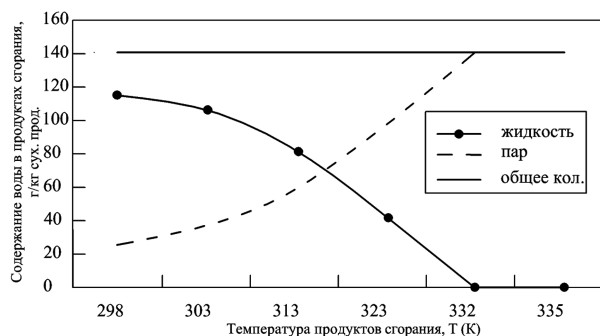


Рис. 10. Зависимость фазового содержания  $H_2O$  от температуры продуктов сгорания.

мом газе исходной топливоокислительной смеси или смеси продуктов сгорания в процессах горения оказывает воздух-окислитель.

Скорость поверхностной конденсации тем выше, чем ниже температура поверхности по сравнению с температурой насыщения при заданном давлении. Наличие в объекте другого газа наряду с парами уменьшает скорость поверхностной конденсации.

Объемная конденсация определяется степенью перенасыщения пара  $\varepsilon$ , зависящей от отношения давления пара  $p_v$  к давлению насыщения  $p_{sat}$  ( $\varepsilon = p_v / p_{sat}$ ). Чем чище пар (отсутствие зародышей — центров конденсации), тем выше должна быть  $\varepsilon$ .

Представленная информация указывает на значимость параметра «точка росы» как важнейшей характеристики фазовых переходов газовой среды. В связи с этим точка росы включена в новый «Технический регламент на природный газ Украины» как важнейший параметр самого газа и продуктов его сгорания.

## Выводы

Точка росы  $t_{dew}$  ( $T_{dew}$ ) — однозначный критерий для оценки влагосодержания газов, газовых смесей (атмосфер) и продуктов сгорания. Чем меньше абсолютная и относительная влажность, тем ниже  $t_{dew}$  любого газа. Для случая воздуха-окислителя при увеличении степени его сухости понижается  $t_{dew}$  продуктов сгорания.

Выполнен расчетный анализ влияния характеристик воздуха-окислителя в процессах горения: коэффициента избытка  $\lambda$ , температуры  $t_a$ , относительной влажности  $\varphi_a$  — на значение  $t_{dew}$  для продуктов сгорания природного, коксового и доменного газов. Несмотря на то, что, по определению, точка росы влажного воздуха соответствует состоянию насыщения, то есть относительной влажности воздуха  $\varphi_a = 100\%$  при  $t_{a,dew}$ , продукты сгорания при температуре  $t_{cp}$

могут иметь некоторую фиксированную точку росы при воздухе-окислителе с любой относительной влажностью  $\varphi_a \in \{0; 100\%$  при условиях, соответствующих конденсирующимся продуктам сгорания — для водородсодержащих топлив, и при  $0 < \varphi_a \leq 100\%$  — для топлив, не содержащих водород, сжигаемых в любом влажном воздухе (то есть кроме сухого состояния).

Точка росы  $t_{dew}$  служит параметром, определяющим степень сухости газов при оценке необходимости их предварительной осушки для использования по основному назначению: природного газа или других топлив — перед транспортировкой; технологических атмосфер (защитных, восстановительных, эндогазов, водородсодержащих и других газов и газовых систем) — перед использованием в печах химико-термической обработки материалов.

Выполнены расчеты точки росы  $t_{dew}$  продуктов сгорания основных газовых топлив с воздухом различной относительной влажности  $\varphi_a$ . По мере повышения  $\varphi_a$  точка росы продуктов сгорания возрастает в связи с повышением парциального давления водяных паров  $p_{H_2O}$ . При этом для топлив с повышенным содержанием водорода (например, при сжигании коксового газа) в случае насыщенного состояния воздуха-окислителя значение  $t_{dew}$  наиболее высокое. Поскольку  $p_{H_2O}$  в продуктах сгорания падает с повышением избытка воздуха-окислителя  $\lambda$ , то для продуктов сгорания бедных смесей ( $\lambda > 1$ ) значение точки росы понижается. Чем больше доля  $H_2O$  в продуктах сгорания, обусловленная окислением водородсодержащих молекул топлива, тем сильнее влияние  $\lambda$  на  $t_{dew}$ . По этой причине кривые более крутые (выше значения  $dt_{dew}/d\lambda$ ) для случаев сжигания топлив с сухим воздухом-окислителем ( $\varphi_a = 0$ ), чем при  $\varphi_a > 0$ . Кроме того, в случае доменного газа влияние избытка воздуха на  $t_{dew}$  продуктов сгорания сказывается намного слабее, чем в случаях природного и коксового газов. Это связано с меньшим содержанием в доменном газе водородсодержащих компонентов.

Абсолютная влажность воздуха-окислителя оказывает значимое влияние на процессы конденсации продуктов сгорания водородсодержащих топлив. При сравнении количества влаги в продуктах сгорания природного газа для температур воздуха-окислителя 273 и 298 К при  $\varphi_a = 100\%$  и  $\lambda = 1,0$  влагосодержание увеличится на 12% при  $T_a = 298$  К. Анализ зависимости точки росы  $t_{dew}$  от коэффициента избытка воздуха  $\lambda$  при разных его температурах  $t_a$  и относительной влажности  $\varphi_a$  для различных горючих газов дает возможность прогнозировать процесс конденсации водяных паров продуктов сгорания в различ-

ных энергетических установках, то есть оценить влияние метеорологических условий (через параметры воздуха-окислителя) на эффективность работы конденсационных котлов.

### Условные обозначения

t, T	– температура, °С, К
NG	– природный газ
BFG	– доменный газ
COG	– коксовый газ
$\lambda$	– коэффициента избытка воздуха
$\varphi$	– относительная влажность воздуха, %
d <sub>e</sub>	– диаметр капли жидкости, мм
$\Delta\tau$	– время выгорания капли, с
$\tau$	– время, с
$\tau_0$	– время начала отсчета, с
K	– константа испарения
p	– давление, Па
d	– влагосодержание, (кг воды)/(кг сухого газа)
i	– удельная энтальпия, кДж/кг
m	– масса, кг
M	– молярная (молекулярная) масса, кг/кмоль
n	– число молей, моль
V	– объем газа, м <sup>3</sup>
R	– универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К)
$\tilde{K}$	– коэффициент соотношения массы воды в продуктах сгорания и общей массы продуктов сгорания
v	– объемное содержание, % (об.)
$\Delta h_V$	– теплота парообразования (конденсации), кДж/кмоль
I	– энтальпия массового потока, кДж/кг
$\varepsilon$	– степень насыщения

### Индексы

dew	– точка росы
wb	– мокрый термометр
$\alpha$	– воздух горения
v	– водяной пар
0	– начало отсчета
sat	– насыщенное состояние
fl	– продукты сгорания
b	– базовое состояние
$\Sigma$	– суммарная величина
V	– при расчетах через объемные доли компонентов
M	– при расчетах через массовые доли компонентов
i	– i-й компонент
CP	– продукты сгорания
cond	– жидкое состояние компонента
dry	– сухой (отсутствие влаги)
atm	– атмосферное давление, Па ( $p_{атм} = 101325$ Па)
g	– горючий газ
mix	– смесь газов
w	– жидкое состояние
v	– паровая

### Список литературы

1. Сорока Б.С., Згурский В.А., Хинкис М.Я. Низкоэмиссионное сжигание подготовленных газо-воздушных смесей в камере с рециркуляцией продуктов сгорания // Современная Наука – Исследования, Идеи, Результаты, Технологии. – 2013. – № 1. – С. 368–374.
2. Energy balance sheets data 2012. Eurostat statistical book. Luxembourg, 2015.
3. Нафтогаз опублікував основні показники діяльності газового ринку України за 2016 рік. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.naftogaz.com>.
4. Таблицы термодинамических свойств / Глушко В.П., Гурвич Л.В., Бергман Г.А. и др. – М. : Наука, 1978. – 327 с.
5. Вильямс Ф.А. Теория горения. – М. : Наука, 1971. – 616 с.
6. Прохоров А.М. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М.Прохоров. – М. : Сов. энцикл., 1984. – 944 с.
7. Луканин В.Н., Шагров М.Г., Камфер Г.М. и др. Теплотехника : Учеб. для вузов. – М. : Высш. шк., 2005. – 671 с.
8. Каулинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. под ред. Е.М.Лейкина. – М. : Мир, 1982. – 520 с.
9. Магадеев В.Ш. Коррозия газового тракта котельных установок. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
10. Соснин Ю.П., Бухаркин Е.Н. Бытовые печи, камины и водонагреватели. – М. : Стройиздат, 1985. – 368 с.
11. Захаренко-Березьянская Ю.А. Украинский рынок конденсационных котлов. Тенденции и перспективы // СОК. – 2005. – № 9. – С. 10–16.
12. Барабаш В.П. Энергетическая эффективность конденсационных котлов // Нова тема. – 2012. – № 2. – С. 55–58.
13. Directive 2009/125/EC: of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products. – [Web resource]. – Access mode: <http://eur-lex.europa.eu>
14. Тарабанов М.Г. Влажный воздух : Справ. пособие. – М. : Авок пресс, 2004. – 42 с.
15. Humidity calculations and conversions made easy. – [Web resource]. – Access mode: <http://www.vaisala.ru/ru/suport/HumidityCalculator/Pages/default.aspx>.
16. Gillan L. Maisotsenko cycle for cooling processes // Int. J. on Energy for a Clean Environment (Clean Air). – 2008. – Vol. 9. – P. 47–64.
17. Jenkins P., Cerza M., Al Saaïd M. Analysis of using the M-cycle Regenerative-Humidification Process on a Gas Turbine // Proceedings of ASME Turbo 2014, Dusseldorf, Germany, June 16–20, 2014. – Dusseldorf : GTI, 2014. – 9 p.
18. Guillet R. The humid combustion to protect environment and to save the fuel: the water vapor pump and Maisotsenko cycles examples // Int. J. on En-

умові, що 100 %-й вміст  $H_2O$  у вигляді пари (без рідкої фази) відповідає температурі насичення (точці роси) продуктів згоряння, яка становить при стехіометричному співвідношенні «повітря : газ» близько 60 °С. *Бібл. 31, рис. 10, табл. 3.*

**Ключові слова:** атмосферне повітря горіння (окислювач), вологовміст продуктів згоряння, абсолютна вологість повітря, відносна вологість повітря, доменний газ, коксовий газ, продукти згоряння, природний газ, температура мокрого термометра, точка роси.

**Soroka B.S.,** *Doctor of Technical Sciences, Professor,* **Horupa V.V.**

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

*39, Dehtyarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: boris.soroka@gmail.com*

## **Analysis of the Process of Water Vapor Condensation within Gas Atmospheres and Combustion Products**

Water vapor is the most important working medium by the processes of energy generation and conversion. The  $H_2O$  content in gases and gas mixtures serves as a standard of their desiccation by technological processes. The presence of vapor in the air-oxidizer provides a reduction of harmful substances formation by combustion. The values characterizing the saturation state: the dew point  $t_{dew}$  and the wet bulb thermometer  $t_{wb}$  temperature are used to evaluate an approximation degree of the wet gas system (any air, gas mixtures or combustion products) to the condensation state. The values of these parameters have been determined for moist air in dependence on the basic temperature and the relative humidity of an air. The lower are the temperature values  $t_{dew}$ ,  $t_{wb}$ , the wider is the region of  $H_2O$  existence in the vapor phase. The EUROSTAT's gas fuels list includes the natural gas (NG), blast furnace gas (BFG), coke oven gas (COG). Calculations of dew point values of the combustion products for the gas fuels: NG, COG, BFG has been carried out in dependence on the characteristics of the combustion air: the oxidizer excess factor  $\lambda$ , the temperature  $t_a$  and the relative humidity  $\phi_a$ . The dew point  $t_{dew}$  values have been found under standard conditions for the combustion products of the listed gas fuels, presented by stoichiometric ( $\lambda = 1.0$ ) mixtures with dry air: pure methane, NG, COG, BFG. The  $t_{dew}$  values make – respectively 59.3; 58.5; 11.1; 61.5. In the case of saturated air as an oxidizer at temperature of 25 °C, the dew point for the combustion products of the listed fuels makes the following values: 62.0; 61.5; 25.6; 64.0 °C respectively. The fractions of  $H_2O$  in the vapor and liquid phases of natural gas combustion products are determined as a function of temperature by condition that the 100 % content of  $H_2O$  in from of vapor state (without water) corresponds to the saturation temperature (or dew point). This temperature has value of about 60 °C for combustion products under stoichiometric air/gas ratio. *Bibl. 31, Fig. 10, Tab. 3.*

**Key words:** atmospheric combustion air (oxidant), moisture content of combustion products, absolute air humidity, relative air humidity, blast furnace gas, coke oven gas, combustion products, dew point natural gas, wet bulb temperature.

### **References**

1. Soroka B.S., Zgurskiy V.O., Khinkis M.Ya. Nizkoemissionnoye szhiganiye podgotovlennykh gazo-vozdushnykh smesey v kamere s retsirkulyatsiyey produktov sgoraniya [Low-emission burning of pre-mixed gas-air mixtures in the chamber by combustion products recirculation], *Sovremennaya Nauka – Issledovaniya, Idei, Rezul'taty, Tekhnologii*, 2013, (1), pp. 368–374. (Rus.)
2. Energy balance sheets data 2012. Eurostat statistical book. Luxembourg, 2015.
3. Naftogaz opublikuvav osnovni pokazniki diyal'nosti gazovogo rinku Ukraini za 2016 rik. – [Online resource]. – Access mode: <http://www.naftogaz.com>. (Ukr.)
4. Glushko V.P., Gurvich L.V., Bergman G.A. Tablitsy termodinamicheskikh svoystv [Tables of thermodynamic properties], Moscow : Nauka, 1978, 327 p. (Rus.)