Топливо и энергетика

УДК 621.1.013(045)

Сорока Б.С., *докт. техн. наук, проф.,* ***Горупа В.В.***
Институт газа НАН Украины, Киев
ул. Дегтяревская, 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 t_{dew}, t_{wb}, тем шире температурная 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 λ, температуры t_a и относительной влажности φ_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 продуктов сгорания углеводородных топлив. Процессы конденсации водяного пара в продуктах сгорания осуществляются в топливоиспользую-

© Сорока Б.С., Горупа В.В., 2017

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 NO_x, CO, а также 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 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 м^3. Еще 11,1 млрд м^3 было закуплено за границей: в Словении — 9,1 млрд м^3 и по 1,0 млрд 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 (тераджоуль — 10^{12} Дж) в 2012 г. [2]. Основными газами этой группы являются доменный и коксовый газы. Последний содержит до 60 % H_2, что обеспечивает минимизацию выбросов 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 (CO_2 и NO_x).

BFG, COG и их смеси относятся к числу печных топлив, а также используются для выработки электричества и теплоты в когенерационных установках (CHP). 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, H_2O 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 H_2O, 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-

сов испарения или кипения-конденсации определяется кинетикой фазовых переходов.

Установлена определяющая роль тепломассопереноса в процессах испарения одиночной капли жидкости и диффузионного стационарного горения капли топлива. Следствием является одинаковый в обоих случаях (горения и испарения) закон изменения диаметра капли d_e за время $\Delta\tau = \tau - \tau_0$ [5]:

$$d^2_{e,0} - d^2_e = K\,(\tau - \tau_0), \qquad (1)$$

где K — константа испарения, не зависящая от t; индекс «0» соответствует началу отсчета времени.

Конденсация может осуществляться либо на охлаждаемых поверхностях, либо внутри объема пара (парогазовой, в том числе паровоздушной смеси). В первом случае, при поверхностной конденсации, имеет место режим пленочной конденсации (для смачиваемых или лиофильных поверхностей), либо режим капельной конденсации (на несмачиваемых или лиофобных поверхностях) [6].

В присутствии неконденсирующихся газов, например, в случае влажного воздуха (воздух + пар) конденсация начинается при достижении паром у поверхности охлаждения парциального давления и температуры, соответствующих состоянию насыщения (точка росы t_{dew}) [7]. Для начала объемной конденсации пар должен быть существенно перенасыщен, что определяется отношением давления пара p_v к давлению насыщения p_{sat} при условии $p_v / p'_{sat} > 1$. Начало конденсации соответствует условию $p_v / p_{sat} = 1$, то есть отвечает насыщенному состоянию пара во влажном воздухе. В отсутствие центров конденсации пар может переохлаждаться ниже точки росы [8].

Конденсация водяного пара, который содержится в продуктах сгорания, сопутствует процессу сжигания газообразного, жидкого или твердого топлива. Конденсация водяного пара продуктов сгорания происходит в конденсационной зоне дымоотводящего канала котла, где температура продуктов сгорания t_{fl} становится равной или меньшей температуры точки росы: $t_{fl} \le t_{dew} = t_{sat}$. Конденсационная зона в зависимости от конструкции котла, режимов его работы и длины дымоходов может перемещаться. Непосредственно после пуска конденсационная зона находится вблизи камеры сгорания, по мере прогревания дымоходов перемещается от камеры сгорания к выходу из дымохода.

Роль конденсации водяных паров продуктов сгорания в теплогенерирующих агрегатах двояка.

С одной стороны, конденсация водяных паров на стенках дымохода приводит к его коррозии и разрушению [9]. Для недопущения этих процессов дымоходы теплоизолируют, изготавливают из кислотоупорных материалов, что увеличивает стоимость котла в целом [10].

С другой стороны, конденсация водяных паров продуктов сгорания позволяет получить и использовать высшую теплоту сгорания топлива. Водяной пар является высокоэнергетическим (относительно высокоэнтальпийным) компонентом продуктов сгорания в связи с включением в величину энтальпии теплоты испарения (latent heat — скрытой теплоты парообразования), что вызвало распространение конденсационных котлов с КПД, превышающим 100 % по низшей теплоте сгорания [11, 12].

Следует отметить, что в Великобритании, Нидерландах, Бельгии, Швейцарии, Португалии и других европейских странах запрещено использование газовых котлов, кроме конденсационных, для устройств мощностью до 70 кВт и бойлеров объемом до 500 л [13].

Анализируя процесс охлаждения продуктов сгорания после начала конденсации, можно утверждать, что для оценки количества H_2O в каждой из фаз (пар, вода) наряду с сухими продуктами сгорания в первом приближении можно ориентироваться на расчет с позиции термодинамического равновесия системы.

Влажный воздух

Воздух — неотъемлемый компонент (окислитель) в процессах сжигания различных топлив. Атмосферный воздух — это смесь сухого воздуха и водяного пара, а также различных загрязнителей (пыль, промышленные, транспортные и другие газовые выбросы). Состав сухого воздуха относительно стабилен: в нем содержится азота 78,08, кислорода 20,94, инертных газов около 1 % (об.). Кроме того, в воздухе всегда присутствует водяной пар, который может быть в перегретом, насыщенном или в сконденсированном взвешенном состоянии в виде капельного или ледяного (при отрицательной температуре) тумана [14]. Относительная влажность φ_a, а также абсолютное влагосодержание воздуха d_a являются важными характеристиками состояния влажного воздуха. Указанные параметры определяют количество водяного пара в зависимости от температуры воздуха.

Процесс нагрева-охлаждения влажного воздуха, реализуемый через стенку, соответствует условию сохранения влагосодержания теплоносителя (d = const) в отличие от случая, когда

имеет место смешение сред и процесс отвечает условию сохранения энтальпии (i = const).

При охлаждении влажного воздуха от исходной точки «b» до линии насыщения при условии d_b = const достигается точка росы (dew point):

$$t_{dew} = t\ (d_b = const,\ \varphi_a = 100\ \%), \qquad (2)$$

а при охлаждении до линии насыщения при условии i = const достигается температура мокрого термометра (wet bulb (moist-bulb) temperature):

$$t_{wb} = t\ (i_b = const,\ \varphi_a = 100\ \%). \qquad (3)$$

Здесь d_b, i_b — координаты анализируемой (базовой) точки по влагосодержанию и энтальпии. Соответствующие значения t_{dew}, t_{wb} могут быть найдены термодинамическим расчетом или определены на i–d диаграмме влажного воздуха.

На рис.1 приведены значения точки росы и температуры мокрого термометра атмосферного воздуха-окислителя. Как видно из рисунка, в случае насыщения воздуха (φ_a = 100 %) значения точки росы и температуры мокрого термометра совпадают. Чем меньше относительная влажность воздуха φ_a, тем различие между значениями точки росы и температуры мокрого термометра больше. Значения температуры мокрого термометра были определены с помощью приложения «Vaisala Humidity Calculator» [15].

Получивший мировую известность цикл В.Майсоценко [16–18] основан на реализации процессов охлаждения среды до t_{dew} вместо t_{wb}, что сопровождается ростом КПД процесса или устройства охлаждения. Поскольку $t_{wb} > t_{dew}$, то понижение температуры теплового приемника до точки росы t_{dew} обеспечивает повышение КПД цикла Карно.



Рис.1. Зависимость точки росы t_{dew} и температуры мокрого термометра t_{wb} влажного воздуха от относительной влажности φ_a при температуре воздуха t_a, °C: 1 — 55; 2 — 35; 3 — 25.

Точка росы газов и продуктов сгорания

Использование газообразного топлива — наиболее доступный процесс получения тепловой энергии во многих странах, расположенных в различных климатических поясах. Рациональная организация процессов сжигания газового топлива в зависимости от климатической зоны должна учитывать локальные характеристики влажного воздуха, подаваемого на горение. Более того, влияние климатических условий на горение и выбор адекватной схемы процесса эффективного сжигания и использования конкретного топлива требует учета состояния атмосферного воздуха, а также энергетических и экологических характеристик горючего газа и продуктов сгорания в условиях фазовых переходов (пар — вода — лед) при насыщении газов.

Горючие газы (доменный, коксовый, генераторный и др.) преимущественно получают в горячих технологических процессах [19, 20]. Изменение абсолютного влагосодержания воздуха, который направляется на горение, соответствует температурному режиму от –30 до +60 °C и относительной влажности от φ_a = 20 % до насыщения (φ_a = 100 %).

В продуктах сгорания водородсодержащих топлив H_2O содержится в газовой (пар) и жидкой (вода) фазе, либо в обоих состояниях одновременно. Массовое соотношение фаз можно полагать зависящим от температуры. Температура однозначно определяет межфазное равновесие при заданном давлении процесса (p_Σ = p = const).

В продуктах сгорания природных газов различных месторождений содержится около 20 % (об.) H_2O в виде пара. Водяной пар является одним из наиболее значимых компонентов продуктов сгорания природных газов.

В табл.1 представлены составы европейских природных газов и брутто-составы влажных и сухих продуктов сгорания [21].

Объемные D_V и молярные D_M доли компонентов продуктов сгорания при давлениях 1–30 бар совпадают при рассмотрении смеси продуктов и отдельных компонентов как идеальных газов [22]:

$$D_{V,i} = D_{M,i} = D_i. \qquad (4)$$

Это предположение с большой точностью (абсолютное расхождение долей (концентрации) компонентов составляет от 0 до 0,08 %) подтверждается экспериментальным определением молярных и объемных долей компонентов природных газов в Европе [22].

Таблица 1. Составы европейских природных газов и их продуктов сгорания

Характеристики	Erdgas H			Erdgas L		
	Nordsee	Misch	Russ.	Holland	Verbund	Weser/Ems
Компонент, % (об.):						
CH_4	90,14	91,18	97,01	83,14	84,46	85,16
N_2	0,94	1,27	0,83	11,17	10,70	10,83
CO_2	1,67	1,57	0,17	1,56	1,66	1,85
C_2H_6	5,72	4,98	1,41	3,29	2,56	1,79
C_3H_8	1,13	0,74	0,43	0,53	0,39	0,24
n-C_4H_{10}	0,15	0,10	0,07	0,10	0,07	0,05
n-C_5H_1	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01
i-C_5H_{12}	0,04	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01
neo-C_5H_{12}	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
C_6+	0,03	0,02	0,01	0,07	0,05	0,03
Высшая теплота сгорания, кВт·ч/м³	11,57	11,37	11,19	10,10	10,03	9,88
Низшая теплота сгорания, кВт·ч/м³	10,45	10,27	10,09	9,12	9,05	8,91
Точка росы*, °C	58	59	59	58	58	59
Влажные продукты сгорания, % (об.):						
CO_2	9,9	9,9	9,7	9,8	9,7	9,7
H_2O	17,5	17,5	17,8	17,4	17,5	17,5
N_2	71,7	71,7	71,7	72	71,9	71,9
Сухие продукты сгорания, % (об.):						
CO_2	12,1	12	11,7	11,8	11,8	11,8
N_2	86,9	87	87,2	87,2	87,2	87,2

* t_{dew} — для продуктов сгорания с сухим воздухом.

Важнейшей характеристикой продуктов сгорания является точка росы [23] — температура, при которой начинается конденсация водяных паров и которая отличается от точки росы влажного воздуха горения [14]. Начиная с этой температуры, водяной пар становится насыщенным (φ = 100 %) [24], а процесс дальнейшего охлаждения на i–d диаграмме проходит по изолинии φ = 100 % [8, 24].

Точка росы является надежным критерием влажности (сухости) газов. Например, отрицательные значения точки росы (t_{dew} < 0 °C) свидетельствуют о малом влагосодержании газов. В опытах [25] технологическая газовая атмосфера (100 % H_2) для процессов блестящего отжига характеризуется чрезвычайно низкими влажностью и температурой точки росы, а также высокой восстановительной способностью: $[H_2]/[H_2O]$ = = 100000 при t_{dew} < −60 °C и $[H_2]/[H_2O]$ = = 10714 при t_{dew} < −45 °C соответственно (рис.2).

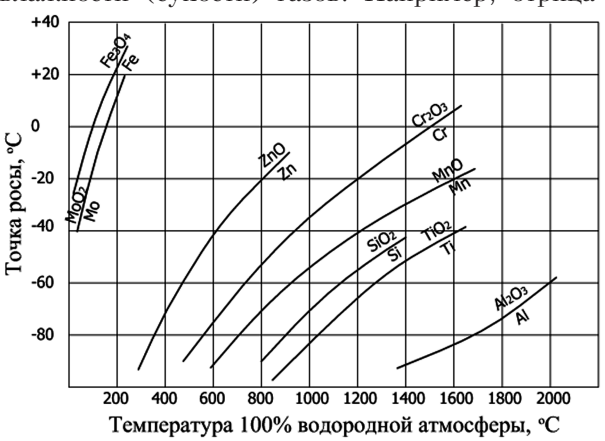


Рис.2. Влияние температуры 100 %-й водородной атмосферы на точку росы в условиях окисления-восстановления металлов [25].

Расчет точки росы продуктов сгорания горючих газов

Перейдем к определению точки росы отдельных газовых смесей. Следует иметь в виду, что влагосодержание продуктов сгорания складывается из H_2O, обусловленного процессом горения и привнесенного содержимым исходных компонентов горения: топливом и окислителем, прежде всего атмосферным (влажным) воздухом.

1. Для продуктов сгорания горючего газа с влажным воздухом заданы температура t_a и относительная влажность φ_a воздуха, определяется полное удельное влагосодержание d'_{CP} с использованием стехиометрических уравнений типа (6). Для определения точки росы t_{dew} следует иметь в виду, что при фиксированном влаго-

содержании продуктов сгорания d_{CP} эта точка соответствует условию:

$$P_{H2O} = p_{sat}\,(t_a,\, p). \qquad (5)$$

Рассмотрим расчетную процедуру на простейшем примере. Химическая реакция окисления метана, например, представляется в следующей форме:

$$CH_4 + 2\lambda\, O_2 + 7{,}52\lambda\, N_2 + \\ + (d_a\, m_{a,dry}/M_{H2O})\, H_2O \rightarrow CO_2 + \\ + 2\, H_2O + 2\,(\lambda - 1)\, O_2 + 7{,}52\,\lambda\, N_2 + \\ + (d_a\, m_{a,dry}/M_{H2O})\, H_2O, \qquad (6)$$

где

$$d_a\, m_{a,dry}/M_{H2O} = n_{H2O,a}; \qquad (7)$$

$$d_a = 0{,}622\, \varphi_a\ p_{sat}(t_a)/(p_{атм} - \varphi_a\, p_{sat}(t_a)); \qquad (8)$$

$$m_{a,dry} = \lambda\,(2\, M_{O2} + 7{,}52\,\lambda\, M_{N2}) = 9{,}52\, M_{a,dry}\,\lambda; \qquad (9)$$

$$d_{CP} = m_{H2O}/m_{CP,dry} = (n_{H2O,CP}/ \\ /n_{CP,dry})\,(M_{H2O}/M_{CP,dry}) = (2 + \\ + n_{H2O,a})\, M_{H2O}/(9{,}52\,\lambda - 1)\, M_{CP,dry}; \qquad (10)$$

$$M_{CP,dry} = M_{CO2} + 2\,(\lambda - 1)\, M_{O2} + 7{,}52\,\lambda\, M_{N2}. \qquad (11)$$

Расчет точки росы и влагосодержания продуктов сгорания метана в случае окислителя — атмосферного воздуха — проводится на 1 моль CH_4 (или на 1 кг метана M_{CH4}) при атмосферном давлении $p = p_{atm}$.

Для атмосферных условий давление водяных паров, в том числе в условиях насыщения, в продуктах сгорания в предположении соответствия отдельных компонентов и смеси в целом состоянию идеального газа может быть получено из уравнения:

$$p_{sat} = p_{H2O} = p_{atm}\, D_{V\ H2O,CP} = p_{atm}\,(2 + \\ + n_{H2O,a})/(9{,}52\,\lambda + n_{H2O,a} + 1). \qquad (12)$$

Это уравнение может быть использовано для определения точки росы.

Таким образом,

$$p_{sat} = f(t_{dew}). \qquad (13)$$

После определения p_{sat} может быть найдена точка росы рассматриваемой парогазовой смеси. Существует несколько эмпирических представлений зависимости давления насыщения от температуры, а также температуры насыщения от давления парогазовой смеси. Один из способов приведен в метрологическом руководстве «Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation» Всемирной метеорологической организации (World Meteorological Organization) за 2008 г. [26].

Давление насыщения водяного пара во влажном воздухе зависит от температуры и рассчитывается по формуле:

$$p_{sat}\,(p,\, t) = f(p)\, p'_{sat}\,(t), \qquad (14)$$

где $f(p)$ — функция от общего давления смеси, которая определяется зависимостью:

$$f(p) = 1{,}0016 + 3{,}15\cdot 10^{-6}\, p - 0{,}074\, p^{-1}. \qquad (15)$$

Согласно указанной в этом руководстве методике, давление насыщения водяного пара рассчитывается по формуле:

$$p'_{sat}\,(t) = 6{,}112\, e^{17{,}62\, t/(243{,}12\, +\, t)}. \qquad (16)$$

В уравнениях (14)–(16) температура задается в градусах Цельсия, давление в гектопаскалях.

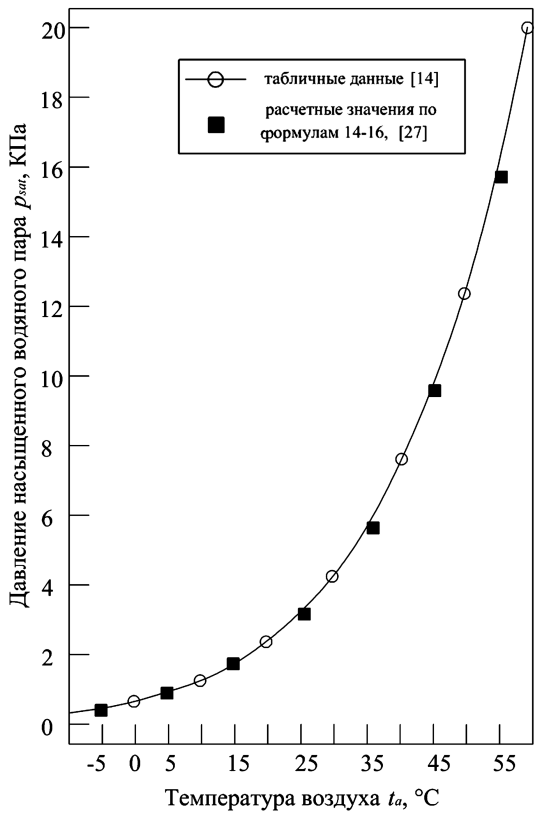


Рис.3. Зависимость давления насыщенных паров p_{sat} от температуры влажного воздуха $t_в$ при давлении влажного воздуха 1 атм.

Давление насыщенного водяного пара над поверхностью воды можно определить по приведенным формулам в зависимости от рассматриваемого диапазона температур [14]. Для насыщенного водяного пара над поверхностью чистой воды в диапазоне температур от 0 до 200 °С предлагается полином:

$$\ln(p_{sat}) = C_1/T = C_2 + C_3\,T + \\ + C_4\,T^2\,C_5\,T^3\,C_6\,\ln T, \qquad (17)$$

где C_1 — константа; C_2–C_6 — коэффициенты полинома.

Табличные и расчетные значениях из источников [14, 26] графически сопоставлены на рис.3; расхождение величин не превышает 0,4 %.

2. Для определения влагосодержания продуктов сгорания используем систему уравнений Дальтона и состояния идеального газа для двух условно отдельных компонентов смеси влажных продуктов сгорания: сухих продуктов сгорания (CP,dry) и пара (H_2O,CP):

$$p_{atm} = p_{\Sigma} = p_{H2O,\,CP} + p_{CP,dry};$$
$$p_{H2O,CP}\,V = (m_{H2O,CP}/M_{H2O})\,RT;$$
$$p_{CP,\,dry}\,V = (m_{CP,dry}/M_{CP,dry})\,RT, \qquad (18)$$

откуда следует соотношение для температурной области выше точки росы:

$$p_{H2O,CP}/(p_{atm} - p_{H2O,CP}) = n_{\,H2O,CP}/ \\ /n_{CP,dry} = (m_{H2O,CP}\,M_{CP,dry})/(M_{H2O} \times \\ \times m_{CP,dry}) = d_{CP}\,M_{CP,dry}/M_{H2O}. \qquad (19)$$

Уравнение (19) полностью аналогично уравнению для влажного воздуха:

$$p_{H2O,a}/p_{a,dry} = n_{H2O,a}/n_{a,dry} = \\ = (m_{H2O,a}/m_{a,dry})\,(M_{a,dry}/M_{H2O}) = \\ = d_a\,M_{a,dry}/M_{H2O}; \qquad (20)$$

$$d_{H2O/CP,dry} = m_{H2O,CP}/m_{CP,dry} = \\ = (M_{H2O}/M_{CP,dry})(p_{H2O,CP}/ \\ /(p_{atm} - p_{H2O,CP})). \qquad (21)$$

По аналогии с определением влагосодержания воздуха, в том числе атмосферного, предлагается влагосодержание продуктов сгорания рассчитывать на единицу массы сухих продуктов сгорания.

На кривой насыщения можно определить точку росы $t_{dew,CP}$ как функцию $d_{H2O/CP,dry}$. Для отыскания абсолютного влагосодержания также можно использовать диаграмму Рамзина. Эта диаграмма в первом приближении может быть использована не только для расчетов, связанных с нагревом и охлаждением воздуха, но и при расчетах процессов тепло- и массообмена между продуктами сгорания газового топлива и водой. Погрешность в определении влагосодержания по сравнению с воздухом не будет превышать 3,2 %, а отклонение при оценке теплосодержания не будет превышать 4,7 % [27].

Возможность с незначительной погрешностью использовать i–d диаграмму состояния влажного воздуха для влажных продуктов сгорания природного газа, по нашему мнению, обусловлена подобием выражений (10) и (21) из уравнений состояния этих газовых смесей. Близкие значения d_{CP} и d_a при заданных $t_{CP} = t_a$ и давлениях системы p = const обусловлены при этом слабым (до 5 %) различием молекулярных масс $M_a \approx M_{CP}$ (табл.2), причем M_a = = 29 кг/кмоль.

Таблица 2. Молекулярные массы продуктов сгорания M_{CP} природного газа с воздухом-окислителем

Коэффициент избытка воздуха λ	M_{CP}	
	воздух сухой	воздух влажный насыщенный (t_a = 25 °С)
1,0	27,68	27,40
1,1	27,76	27,46
1,25	27,87	27,55
1,5	28,05	27,66
2,0	28,37	27,88
3,0	28,87	28,22

Анализ результатов расчета точки росы продуктов сгорания горючих газов

Согласно приведенной выше методике был выполнен расчет точки росы продуктов сгорания метана, природного газа, доменного и коксового газа (сухие газы). Полученные результаты представлены на рис.4–7. Состав природного, коксового и доменных газов был принят по данным комбината «Запорожсталь». Эти газы в зависимости от времени года имеют разные температуру, влагосодержание и, как следствие, массовые составы; их получают и используют в технологическом цикле комбината.

Так, по сообщению комбината «Запорожсталь», при реконструкции цеха холодной прокатки была предусмотрена возможность работы термических печей на природном газе или смешанных газах. В летний период предусматривается работа термических печей на коксодоменной смеси, в зимний — на природно-доменной смеси. Среднегодовая температура коксового газа — 35 °С (минимум — 20 °С, максимум —

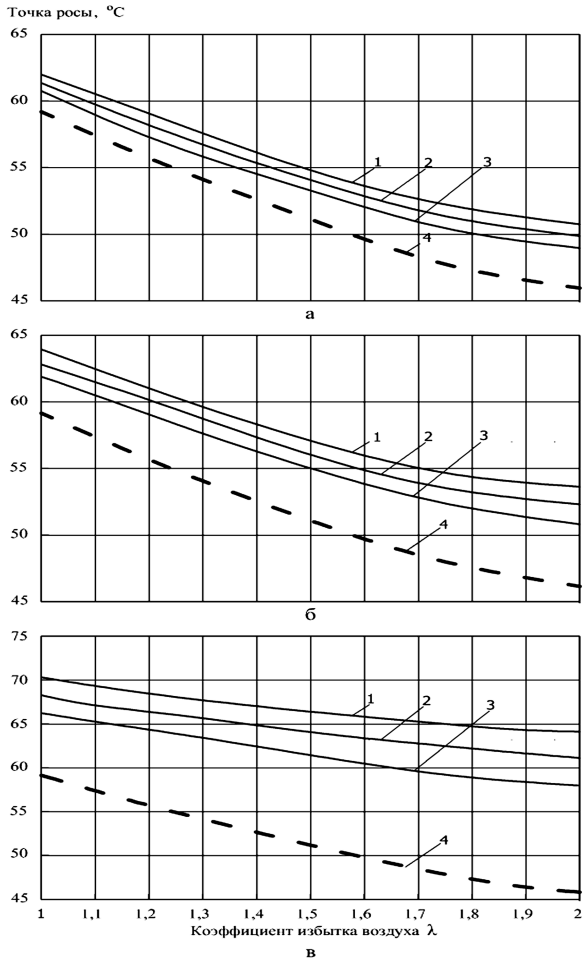


Рис.4. Зависимость точки росы t_{dew} продуктов сгорания метана от коэффициента избытка воздуха горения λ с различной исходной температурой t_a, °С (T_a, К) : а — 25 (298); б — 35 (308); в — 55 (328); относительная влажность атмосферного воздуха-окислителя φ_a, %: 1 — 100 (влажный насыщенный воздух); 2 — 80; 3 — 60; 4 — 0 (сухой воздух).

45 °С), относительная влажность газов — 100 % при рабочей температуре, среднегодовая температура доменного газа — 35 °С (минимум — 20 °С, максимум — 65 °С), относительная влажность — 100 % при рабочей температуре. Расчетная температура природного газа — 10 °С, газ сухой. В соответствии с режимами работы печей на комбинате на рис.4–7 представлены зависимости точки росы продуктов сгорания различных топлив от коэффициента избытка воздуха.

В табл.3 представлен состав отдельных горючих газов и технологических топлив, а также газ, получаемый пиролизом биомассы [28], который содержит значительное количество H_2O (84,7 %), что существенно влияет на точку росы.

Анализируя точку росы метана и природного газа при одинаковых температурах воздуха горения, можно видеть их незначительное расхождение. Это обусловлено тем, что природный газ, для которого проводился расчет, в основном содержит метан (CH_4 = 93,5 %).

На рис.4–7 пунктирной линией показана точка росы продуктов сгорания топлива в сухом воздухе (водяной пар отсутствует). Линии 1–3 относятся соответственно к температурам точки росы для насыщенного воздуха φ_a = = 100 %, 2 — 80 %, 3 — 60 %, (для всех рисунков). Из рисунков видно, что с увеличением температуры воздуха горения повышается значение точки росы, что связано с увеличением парциального давления H_2O, а также абсолютного влагосодержания воздуха горения d_a при фиксированной относительной влажности. Увеличение коэффициента избытка воздуха λ приводит к снижению точки росы t_{dew}. Характер (скорость) снижения t_{dew} продуктов сгорания с ростом λ зависит от количества влаги в продуктах сгорания, вносимой с влагой воздуха, и H_2O, образованной в результате химического превращения водородсодержащих молекул.

Увеличение λ приводит к уменьшению КПД теплового агрегата в целом. Построив графики зависимости точки росы t_{dew} от коэффициента избытка воздуха λ для действующих энергетических установок, можно анализировать существующий процесс сжигания топлива с целью получения наилучших показателей (точка росы, коэффициент избытка воздуха, КПД) в зависимости от метеорологических параметров воздуха-окислителя: температуры и относительной влажности.

Для влажных технологических газов возможна оценка влагосодержания посредством указания на состояние насыщения газа при фиксированных температурах $t_g = t_{sat} = t_{dew}$:

Таблица 3. Компонентный состав газов, используемых в технологических процессах, % (об.)

Газ	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_6H_6	$C_{10}H_{22}$	H_2	CO	CO_2	H_2O	N_2	O_2
Природный газ	93,53	4,62*	–	–	–	–	–	0,56	–	1,29	0,01
Доменный газ	–	–	–	–	–	3,62	25,37	19,45	–	51,56	–
Коксовый газ	26,7	–	–	2,6	–	57,1	2,90	4,20	–	6,50	–
Газ пиролиза биомассы [28]	2,20	0,20	0,3	–	3,3	3,20	1,30	4,80	84,7	–	–

* Сумма непредельных углеводородов в пересчете на этан (C_2H_6).

$$p_{sat}\,(t_{dew}) + p_{g,dry} = p_{\Sigma} = p; \quad (22)$$

$$p_{sat}/(p - p_{sat}) = (m_{H2O}/m_{g,dry}) \times$$

$$\times\,(M_{g,dry}/M_{H2O}) = d_{H2O,g}\,M_{g,dry}/M_{H2O}; \quad (23)$$

$$n_{H2O}/n_g = p_{sat}/(p - p_{sat}) =$$

$$= d_{H2O,g}\,M_{g,dry}/M_{H2O}; \quad (24)$$

$$d_{H2O,g} = (p_{sat}/(p - p_{sat}))(M_{H2O}/M_{g,dry}); \quad (25)$$

$$m_{H2O} = d_{H2O,g}\,m_{g,dry}; \quad (26)$$

$$n_g^{-1}\,\Sigma n_i = \Sigma D_i = 1, \quad (27)$$

причем в случае идеального газа справедливо выражение (4).

При сравнении рис.6 и 7 для продуктов сгорания рассматриваемых топлив видно, что для доменного газа точка росы имеет наименьшие значения t_{dew}. При этом кривые имеют небольшой угол наклона по коэффициенту избытка воздуха. Это связано с тем, что в составе доменного газа мало водородсодержащих компонентов и влага, вносимая с воздухом, имеет незначительное влияние на точку росы продуктов сгорания доменного газа, поскольку массовое стехиометрическое число Ω_{st} для BFG существенно меньше, чем для коксового газа. Особенно превосходит Ω_{st} для природного газа соответствующую величину для BFG более, чем на порядок.

На рис.4–7 представлены значения точки росы продуктов сгорания различных газовых топлив для влажного и сухого воздуха (теоретический расчет). Разница между значениями точки росы продуктов сгорания для сухого и влажного воздуха при его одинаковых температурах зависит от компонентного состава топлива, а именно: от доли водородсодержащих компонентов в топливе, степени влажности топлива и окислителя. Из графиков видно, что наибольшая разница у доменного газа, а наименьшая у коксового газа.

Чем выше значение точки росы, тем круче зависимость температуры насыщения от влагосодержания продуктов сгорания и тем меньше различие t_{dew} между случаями сухого и влажного воздуха горения.

Правильность проведенных расчетов подтверждает совпадение полученных значений точек росы продуктов сгорания природного газа при $\lambda \in \{1{,}0\ldots8{,}0\}$ с литературными данными [29].

На рис.8 приведена зависимость точки росы от объемного содержания водяных паров в продуктах сгорания.

Построенные графики (рис.4–7) дают представление о возможности утилизации теплосодержания продуктов сгорания в контакт-

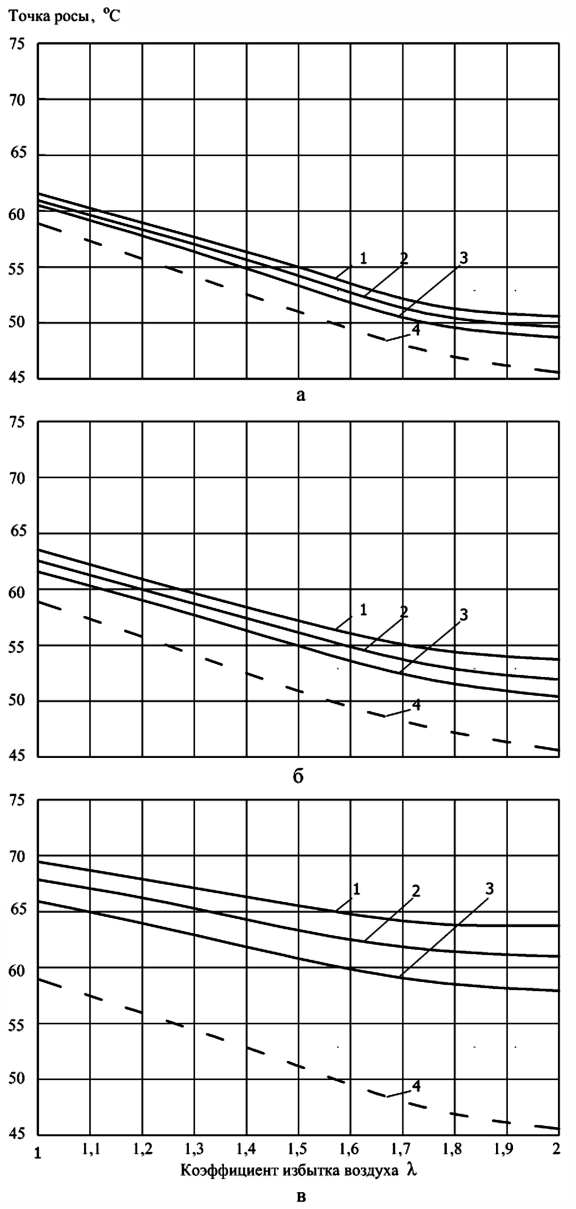


Рис.5. Зависимость точки росы продуктов сгорания t_{dew} от коэффициента избытка воздуха горения λ с разными исходными температурами t_a, °С (T_a, К): а — 25 (298); б — 35 (308); в — 55 (328); относительная влажность атмосферного воздуха-окислителя φ_a, %: 1 — 100 (влажный насыщенный воздух); 2 — 80; 3 — 60; 4 — 0 (сухой воздух). Топливо — природный газ, $[CH_4]$ = 93,5 %.

ных водонагревателях при проведении различных технологических процессов. Чем выше исходное влагосодержание продуктов сгорания, тем до более высокой температуры можно нагреть воду в контактной камере [27].

Величина точки росы имеет значение для оценки энергетических возможностей конденсационных котлов, ибо при температуре уходящих газов t_{ex} выше t_{dew} воспользоваться пре-

имуществами систем конденсации невозможно. Учитывая переменные во времени параметры воздуха горения (t_a, φ_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 = const увеличивается относительная влажность, а при достижении φ_{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 $[H_2O]_\Sigma = [H_2O]_w + [H_2O]_v$:

$$m_{H2O} / m_{mix} = \tilde{K} = (n_{H2O} / n_{mix})\,(M_{H2O} / M_{mix}). \quad (28)$$

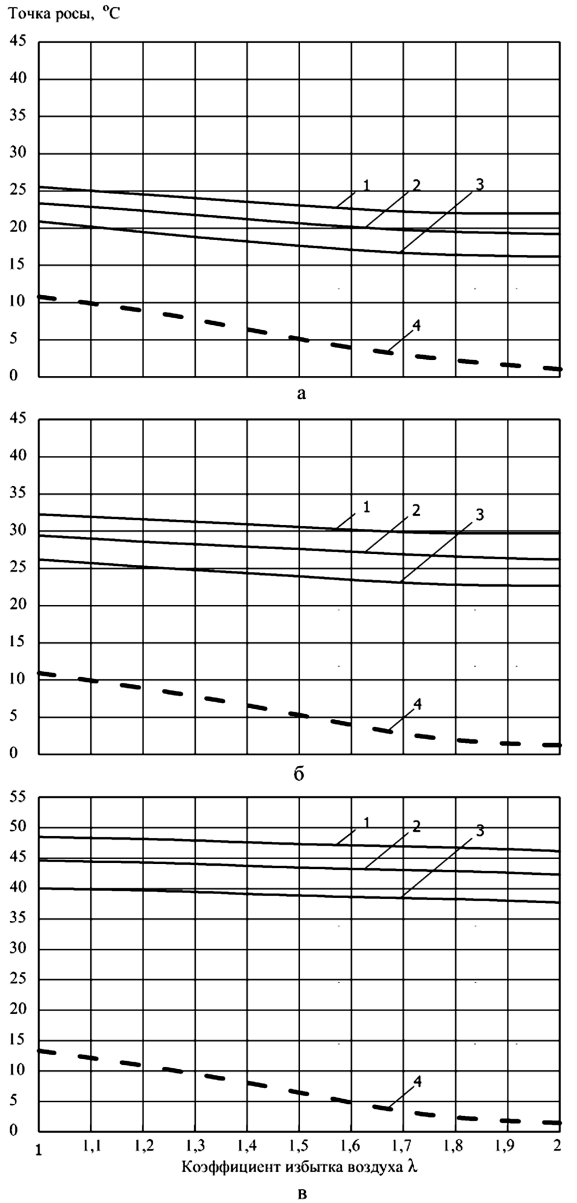


Рис.6. Зависимость точки росы продуктов сгорания t_{dew} от коэффициента избытка воздуха горения λ с разными исходными температурами t_a, °С (T_a, К): а — 25 (298); б — 35 (308); в — 55 (328); относительная влажность атмосферного воздуха-окислителя φ_a, %: 1 — 100 (влажный насыщенный воздух); 2 — 80; 3 — 60; 4 — 0 (сухой воздух). Топливо — сухой доменный газ (см. табл.2).

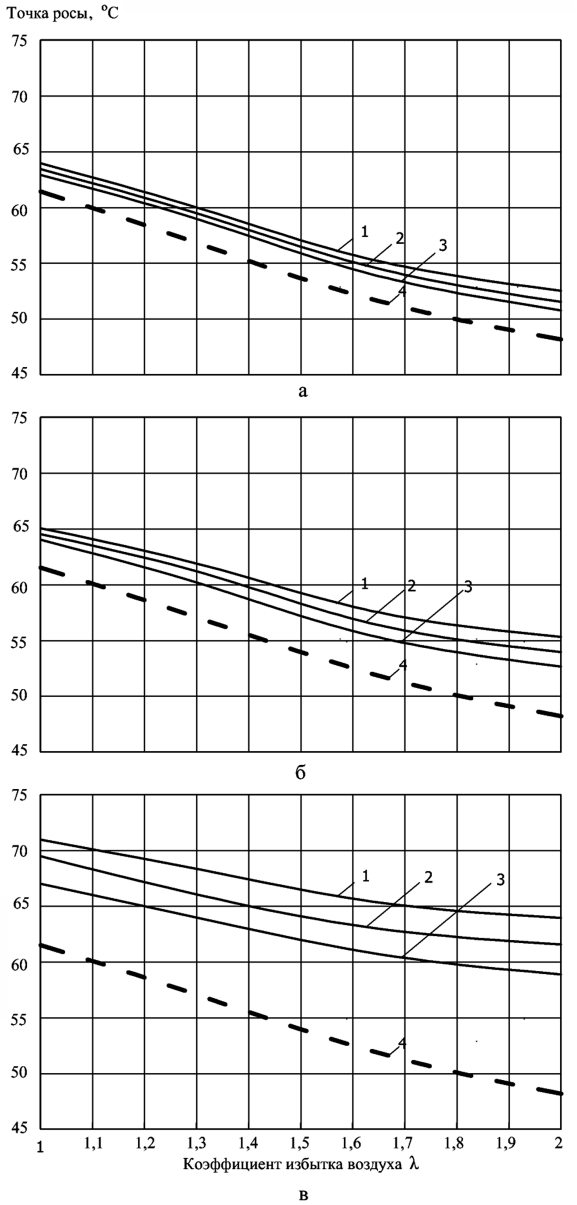


Рис.7. Зависимость точки росы продуктов сгорания t_{dew} от коэффициента избытка воздуха горения λ с разными исходными температурами t_a, °С (T_a, К): а — 25 (298); б — 35 (308); в — 55 (328); относительная влажность атмосферного воздуха-окислителя φ_a, %: 1 — 100 (влажный насыщенный воздух); 2 — 80; 3 — 60; 4 — 0 (сухой воздух). Топливо — сухой коксовый газ (см. табл.2).

Влагосодержание $d_{cond,CP}$ при этом определяется по зависимости для конденсированной части H_2O:

$$d_{w,CP} = d_{CP} - d_{v,CP}. \quad (29)$$

Для расчета равновесного состава продуктов сгорания при заданных значениях температуры t и давления p, включая раздельное определение $[H_2O]$ как одного из компонентов в жидкой и газовой фазах, используется решение системы уравнений термодинамического равновесия системы из отдельных газообразных и жидких компонентов продуктов сгорания [29]. Этот подход реализуется с использованием программного продукта «FUEL», разработанного в Институте газа НАН Украины (руководитель — профессор Б.С.Сорока).

Как следует из определения точки росы и показано расчетами равновесных составов продуктов сгорания (см. рис.10), при температуре точки росы t_{dew} содержание H_2O в жидкой фазе равно нулю.

Установлено, что точка росы, определяемая по доле $D_{H2O} = n_{H2O}\, n_{\Sigma}^{-1} = p_{H2O}\, p^{-1}$ по кривой насыщения $p_{H2O} = p_{H2O,sat} = f(t_{dew})$, с одной стороны, и по расчету состава равновесных продуктов сгорания, когда t_{dew} определяется по условию $t_{dew} = t_{min}$ ($[H_2O]_w = 0$), с другой стороны, дает практически совпадающие значения: $t_{sat} \approx t_{dew}$.

Энергетический анализ топливоиспользующего оборудования выполняется в терминах полных энтальпий [31]. При этом важнейшим компонентом продуктов сгорания водородсодержащих топлив есть вода, которая может быть в паровой H_2O,v и в жидкой H_2O,w фазах. Энтальпии воды при этом отличаются на величину теплоты парообразования (конденсации) ΔH_v:

$$I_{H2O,v} - I_{H2O,w} = \Delta H_v. \quad (30)$$

Поэтому при проведении расчетов необходимо знать количества молей, молярную (или для идеального газа объемную) и массовую доли каждой из составляющих (жидкой, паровой) H_2O. Дополнительный вклад в энтальпию пароводяной смеси H_2O, содержащихся в рассматривае-

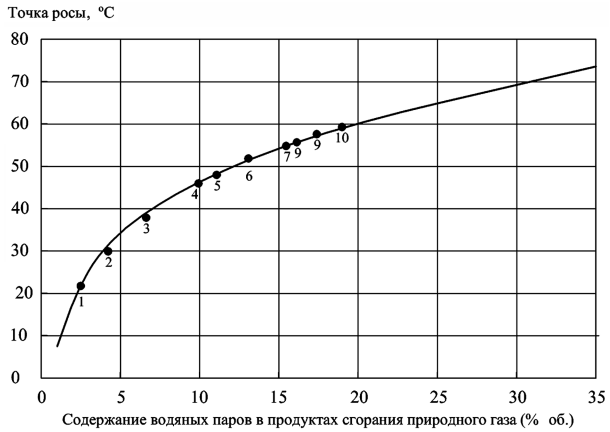


Рис.8. Зависимость точки росы t_{dew} продуктов сгорания природного газа с сухим воздухом от содержания водяных паров. Точки — результаты наших расчетов, сплошная линия — по данным работы [30]. Коэффициент избытка воздуха λ для точек: 1 — 8,0; 2 — 5,0; 3 — 3,0; 4 — 2,0; 5 — 1,8; 6 — 1,5; 7 — 1,3; 8 — 1,2; 9 — 1,1; 10 — 1,0.

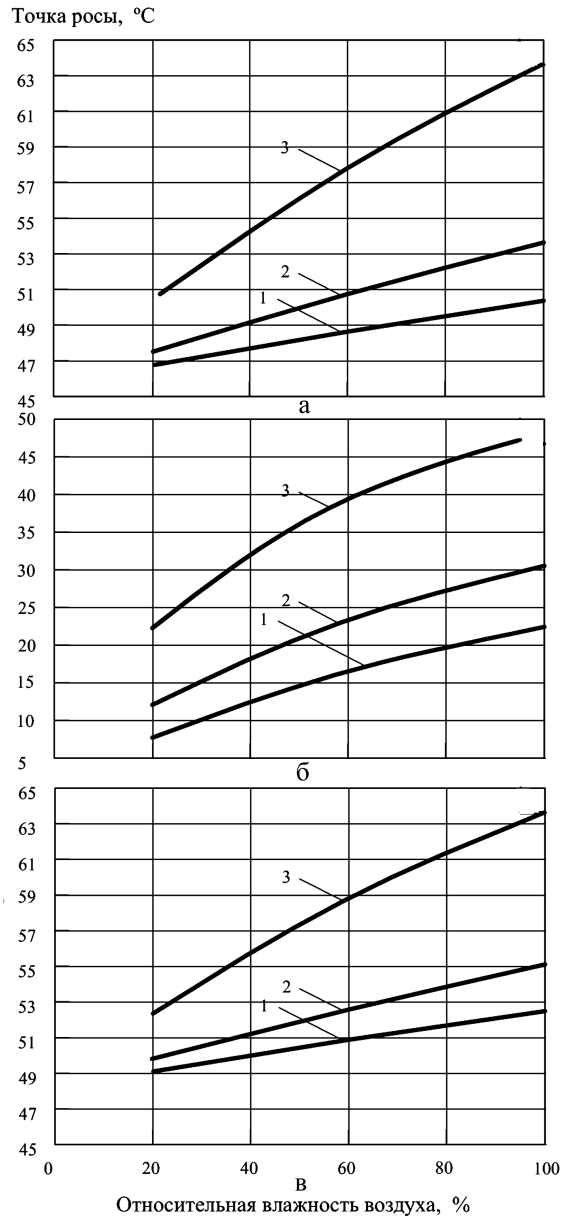


Рис.9. Зависимость точки росы t_{dew} продуктов сгорания от относительной влажности φ_a атмосферного воздуха-окислителя с исходной температурой t_a, °С (T_a, К): 1— 25 (298); 2 — 35 (308); 3 — 55 (328); а — природный газ, б — доменный газ, в — коксовый газ; λ = 2,0.

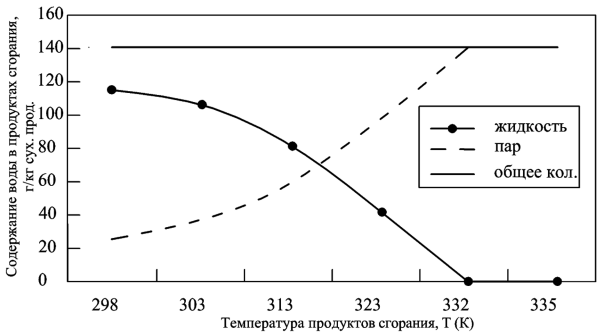


Рис.10. Зависимость пофазового содержания H_2O от температуры продуктов сгорания.

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 ε, 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 ε.

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 λ, температуры t_a, относительной влажности φ_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 φ_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 $0 < \varphi_a \le 100$ % — 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 φ_a. По мере повышения φ_a точка росы продуктов сгорания возрастает в связи с повышением парциального давления водяных паров p_{H2O}. 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_{H2O} в продуктах сгорания падает с повышением избытка воздуха-окислителя λ, 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 λ 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 φ_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 λ при разных его температурах t_a и относительной влажности φ_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, °C, K
NG	–	природный газ
BFG	–	доменный газ
COG	–	коксовый газ
λ	–	коэффициента избытка воздуха
φ	–	относительная влажность воздуха, %
d_e	–	диаметр капли жидкости, мм
τ	–	время, 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^3
R	–	универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К)
$\widetilde{K}$	–	коэффициент соотношения массы воды в продуктах сгорания и общей массы продуктов сгорания
D	–	доля
ΔH_V	–	теплота парообразования (конденсации), кДж/кмоль
I	–	энтальпия массового потока, кДж/кг
ε	–	степень насыщения
Ω	–	массовое стехиометрическое число

Индексы

dew	–	точка росы
wb	–	мокрый термометр
α	–	воздух горения
v	–	водяной пар
sat	–	насыщенное состояние
fl	–	продукты сгорания
b	–	базовое состояние
Σ	–	суммарная величина
V	–	при расчетах через объемные доли компонентов
M	–	при расчетах через массовые доли компонентов
i	–	i-й компонент
CP	–	продукты сгорания
dry	–	сухой (отсутствие влаги)
atm	–	атмосферное давление, Па ($p_{атм}$ = 101325 Па)
g	–	горючий газ
mix	–	смесь газов
w	–	жидкое состояние
v	–	пар
st	–	для стехиометрической горючей смеси
ex	–	на срезе топочной камеры

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., Шатров 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-Березянская 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 Saaid 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-

ergy for a Clean environment. — 2011. — Vol. 12. — P. 259–271.
19. Сорока Б.С. Использование альтернативных газов с целью экономии природного газа при отоплении высокотемпературных агрегатов // Відновлювальна енергетика. — 2010. — № 1. — С. 5–17.
20. Сорока Б.С., Корниенко А.В. Использование альтернативных газов с целью экономии природного газа при отоплении высокотемпературных агрегатов. Часть 2. Определение энергетических характеристик альтернативных газовых топлив в условиях замещения природного газа // Відновлювальна енергетика. — 2011. — № 4. — С. 62–75.
21. Anne Giese, Huseyin Yalmaz, Jorg Leicher, Eren Tali. Development of a multi-fuel burner for operation with light oil, natural gas and low calorific value gas // Heat Processing. — Nov. 2013. — Vol. 11. — Iss. 4. — P. 49–56.
22. Карп И.Н., Сорока Б.С., Дашевский Л.Д., Семернина С.Д. Продукты сгорания природного газа при высоких температурах. — Киев : Техника, 1967. — 382 с.
23. Яворский Б.М., Селезнев Ю.А. Справочное руководство по физике. — М. : Наука, 1989. — 576 с.
24. Стабников В.Н., Лисянский В.М., Попков В.Д. Процессы и аппараты пищевых производств. — М. : Агропромиздат, 1985. — 503 с.
25. Eppensteiner S. Bright annealing technology for higt-alloyed steel strip — a comparison of concepts // Heat Processing. — Nov. 2015. — Vol. 13. — Iss. 4. — P. 45–50.
26. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. — [Web resource]. — Access mode : https://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf.
27. Соснин Ю.П. Контактные водонагреватели. — М. : Стройиздат, 1974. — 359 с.
28. Ahmad Al-Halbouni, Anne Giese, Jord Leicher, Klaus Gorner, Dieter Schillingmann, Hartmut Schillingmann, Christian Huwelmann. Burner system using entrained hot pypolysis gas from biomass // Heat Processing. — Nov. 2015. — Vol. 13. — Iss. 4. — P. 69–74.
29. Бондаренко Б.И., Сорока Б.С., Безуглый В.К. Межфазный углеродообмен: термодинамика и процессы переноса НВП. — Киев : Наук. думка. — 2013. — 209 с.
30. Flue gas dew point temperatures. — [Web resource]. — Access mode: http://www.engineeringtoolbox.com/dew-point-flue-gases-d_1583.html
31. Бэр Г.Д. Техническая термодинамика. — М. : Мир, 1977. — 519 с.

Поступила в редакцию 23.02.17

Сорока Б.С., докт. техн. наук, проф., Горупа В.В.
Інститут газу НАН України, Київ
ул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: boris.soroka@gmail.com

Аналіз процесу конденсації водяної пари в газових атмосферах та продуктах згоряння

Водяна пара — найважливіше робоче тіло у процесах генерування та перетворення енергії. Вміст H_2O в газах та газових сумішах є мірою їх осушення в технологічних процесах. Наявність пари в повітрі-окислювачі забезпечує зменшення утворення шкідливих речовин при горінні. Для оцінки наближення вологої газової системи (повітря, газових сумішей або продуктів згоряння) до стану конденсації використовуються температури, що характеризують стан насичення: точка роси t_{dew} та температура мокрого термометра t_{wb}. Встановлено значення цих параметрів для вологого повітря в залежності від базової температури та відносної вологості повітря. Чим нижче значення температур t_{dew}, t_{wb}, тим ширша область існування H_2O у паровій фазі. До числа газових палив, за класифікацією EUROSTAT, належать природний газ (NG), доменний газ (BFG), коксовий газ (COG). Проведено розрахунки залежності точки роси продуктів згоряння NG, COG, BFG від характеристик повітря горіння: коефіцієнта надлишку окислювача λ, температури t_a та відносної вологості φ_a. Встановлена точка роси t_{dew} для продуктів згоряння перерахованих газових палив при стандартних умовах, які представлені стехіометричними ($\lambda = 1{,}0$) сумішами з сухим повітрям: чистого метану, NG, COG, BFG — відповідно 59,3; 58,5; 11,1; 61,5. У випадку вологого насиченого повітря при температурі 25 °С точка роси для продуктів згоряння представлених палив відповідно становить 62,0; 61,5; 25,6; 64,0 °С. Знайдено частки H_2O у паровій та рідкій фазах продуктів згоряння природного газу в залежності від температури при

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 λ, the temperature t_a and the relative humidity φ_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 folloving 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., Zgurskyi V.O, Khinkis M.Ya. Nizkoemissionnoye szhiganiye podgotovlennykh gazo-vozdushnykh smesey v kamere s retsirkulyatsiyey produktov sgoraniya [Low-emission burning of premixed 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. GlushkoV.P., Gurvich L.V., BergmanG.A. Tablitsy termodinamicheskikh svoystv [Tables of thermodynamic properties], Moscow : Nauka, 1978, 327 p. (Rus.)

5. Vil'yams F.A. Teoriya goreniya [Theory of combustion], Moscow : Nauka, 1971, 616 p. (Rus.)
6. Prokhorov A.M. Fizicheskiy entsiklopedicheskiy slovar' [Physical encyclopedic dictionary], Moscow : Sovetskaya entsiklopediya, 1984, 944 p. (Rus.)
7. Lukanin V.N., Shatrov M.G., Kamfer G.M. Teplotekhnika [Heat engineering], Moscow : Vysshaya shkola, 2005, 671 p. (Rus.)
8. Kuhling H. Spravochnik po fizike [Handbook of Physics], Moscow : Mir, 1982, 520c. (Rus.)
9. Magadeyev V.Sh. Korroziya gazovogo trakta kotel'nykh ustanovok [Corrosion of the gas path of boiler plants], Kiev : Energoatomizdat, 1986, 272 p. (Rus.)
10. Sosnin Yu. P., Bukharkin Ye. N. Bytovyye pechi, kaminy i vodonagrevateli [Household stoves, fireplaces and water heaters], Kiev : Stroyizdat, 1985, 368 p. (Rus.)
11. Zakharenko-Berezyanskaya Yu. A. Ukrainskiy rynok kondensatsionnykh kotlov. Tendentsii i perspektivy. [Ukrainian market of condensing boilers. Trends and prospects], *SOK*, 2005, (9), pp. 10–16. (Rus.)
12. Barabash V.P. Energeticheskaya effektivnost' kondensatsionnykh kotlov [Energy efficiency of condensing boilers], *Nova tema*, 2012, (2), pp. 55–58. (Rus.)
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. Tarabanov M.G. Vlazhnyy vozdukh. [Humid air], Moscow : Avok press, 2004, 42 p. (Rus.)
15. Humidity calculations and conversions made easy. — [Web resource]. — Access mode: http://www.vaisala.ru/ru/support/HumidityCalculator/Pages/default.aspx.
16. Gillan L. Maisotsenko cycle for cooling processes, *Int. J. on Energy for a Clean Environment (Clean Air),* 2008, 9, pp. 47– 64.
17. Jenkins P., Cerza M., Saaid M. Al. Analysis of using the M-cycle Regenerative-Humidification Process on a Gas Turbine, *Jenkins Proceedings of ASME Turbo 2014u GTI*, Dusseldorf, Germany, June 16–20, 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 Energy for a Clean environment*, 2011, 12, pp. 259 –271.
19. Soroka B.S. Ispol'zovaniye al'ternativnykh gazov s tsel'yu ekonomii prirodnogo gaza pri otoplenii vysokotemperaturnykh agregatov [Use of alternative gases for the purpose of saving natural gas in heating high-temperature aggregates], *Vidnovlyuval'na yenergetika*, 2010, (1), pp. 5–17. (Rus.)
20. Soroka B.S., Korniyenko A.V. Ispol'zovaniye al'ternativnykh gazov s tsel'yu ekonomii prirodnogo gaza pri otoplenii vysokotemperaturnykh agregatov. Chast' 2. Opredeleniye energeticheskikh kharakteristik al'ternativnikh gazovikh topliv v usloviyakh zameshcheniya prirodnogo gaza [Use of alternative gases to save natural gas when heating high-temperature units. Part 2. Determination of the energy characteristics of alternative gas fuels under conditions of substitution of natural gas], Vidnovlyuval'na yenergetika, 2011, (4), pp. 62–75. (Rus.)
21. Anne Giese, Huseyin Yalmaz, Jorg Leicher, Eren Tali. Development of a multi-fuel burner for operation with light oil, natural gas and low calorific value gas, *Heat Processing*, Nov. 2013, 11, Iss. 4, pp. 49–56.
22. Karp I.N., Soroka B.S., Dashevckiy L.D., Semernina S.D. Produkty sgoraniya prirodnogo gaza pri vysokikh temperaturakh [Products of combustion of natural gas at high temperatures], Kiev : Tekhnika, 1967, 382 p. (Rus.)
23. Yavorskiy B.M., Seleznev Yu.A. Spravochnoye rukovodstvo po fizike [Reference manual on physics], Moscow : Nauka, 1989, 576 p. (Rus.)
24. Stabnikov V. N., Lisyanskiy V. M., Popkov V. D. Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv Lisyanskiy [Processes and devices of food production], Moscow : Agropromizdat, 1985, 503 p. (Rus.)
25. Sascha Eppensteiner. Bright annealing technology for higt-alloyed steel strip — a comparison of concepts, *Heat Processing*, Nov. 2015, 13, Iss. 4, pp. 45–50.
26. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. — [Online resource]. — Access mode: https://www.wmo.int/pages/prog/gcos /documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf
27. Sosnin Yu. P. Kontaktnyye vodonagrevateli [Contact water heaters], Moscow : Stroyizdat, 1974, 359 p. (Rus.)
28. Ahmad Al-Halbouni, Anne Giese, Jord Leicher, Klaus Gorner, Dieter Schillingmann, Hartmut Schillingmann, Christian Huwelmann, Burner system using entrained hot pypolysis gas from biomass, *Heat Processing*, Nov. 2015, 13, Iss. 4, pp. 69–74.
29. Bondarenko B. I., Soroka B. S., Bezugliy V. K. Mezhfaznyy uglerodoobmen: termodinamika i protsessy perenosa [Interphase carbon exchange: thermodynamics and transport processes], Kiev : Naukova dumka, 2013, 209 p. (Rus.)
30. Flue gas dew point temperatures. — [Online resource]. — Access mode: http://www.engineeringtoolbox.com/dew-point-flue-gases-d_1583.html
31. Ber G. D. Tekhnicheskaya termodinamika [Technical thermodynamics], Moscow : Mir, 1977p. (Rus.)

Received February 23, 2017