

- ment trend of the world. *Energotechnologii i Resurcosberezhnie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2012, (2), pp. 54–69. (Rus.)
21. Tschapowetz E., Krammer H., Geidies J. Use of regenerative burner systems in batch-wise furnace operation. *Heat Processing*, 2013, (2), pp. 61–66.
 22. Tschapowetz E., Krammer H., Geidies J. Einsatz von regenerativen Brennersystemen im satzweisen Ofenbetrieb. *GasWarme Intern.*, 2013, (3), pp. 69–75. (Germ.)
 23. Wunning J.G. Gap flow burners in industrial applications. *Heat Processing*, 2013, (2), pp. 101–103.
 24. Whipple D., Teufert J., Domagala J. High efficiency burner systems for aluminium melting furnaces. *Heat Processing*, 2010, (8), iss. 2, pp. 139–144.
 25. Scimone S., Carrara G. Modern reheating practices focus on combustion technology. *Heat Processing*, 2011, (9), iss. 2, pp. 163–168.

Received June 21, 2013

УДК 621.18:632.15

Сигал И.Я., докт. техн. наук, проф., **Смихула А.В.**, канд. техн. наук, **Марасин А.В.**, аспирант, **Куц В.П.**, **Домбровская Э.П.**, канд. техн. наук, **Колчев В.А.**, **Кернажицкая Е.С.**

Институт газа НАН Украины, Киев

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: isigal@ukr.net

Экспериментальное исследование биогаза как топлива для котлов

На лабораторных огневых стендах проведены исследования горения смесей природного газа и диоксида углерода (имитация биогаза). Показано, что биогаз является хорошим котельным топливом и может замещать природный газ в существующих котлах при условии реконструкции или замены горелочных устройств. Экспериментально определено, что длина биогазового факела меньше, чем факела природного газа такой же тепловой мощности. Токсичность выброса продуктов сгорания биогаза меньше, чем природного газа. При сжигании биогаза особое внимание надо уделять стабилизации факела из-за склонности его к отрыву ввиду меньшей нормальной скорости распространения пламени. При балластировании природного газа диоксидом углерода в количестве 12 % и более не наблюдалось классической тенденции изменения длины факела, которая характерна для природного газа при переходе из ламинарного режима горения в турбулентный. *Библ. 14, рис. 5, табл. 1.*

Ключевые слова: котлы, горение, биогаз, оксиды азота, пламя.

Биогаз представляет собой смесь метана и диоксида углерода, в которой в небольших количествах могут содержаться азот, кислород, а также сероводород и другие примеси. Приставка «био» в слове «биогаз» указывает на то, что газ является продуктом жизнедеятельности метанобразующих бактерий, которые разлагают органические отходы.

Многие предприятия (станции аэрации для очистки городских стоков, спиртовые, пивзаводы и др.) имеют проблемы с хранением жидких и твердых органических отходов, так как необходимые для этого земельные участки, как пра-

вило, арендуются у сельхозпредприятий, которые повышают арендную плату или вообще отказывают в аренде из-за возможности использования земли по другому назначению. Поэтому переработка органических отходов в биогаз и при возможности в удобрения (что позволяет вернуть часть затрат на строительство биогазовых установок, а в некоторых случаях и окупить проект) является единственно возможным вынужденным решением этой проблемы.

С принятием Закона Украины от 20.11.12 № 5485-VI при соблюдении некоторых условий возможно получить зеленый тариф на произве-

денную электроэнергию с использованием биогаза как топлива, то есть государство помогает окупить строительство биогазовых установок [1]. Однако получение электроэнергии из биогаза требует дополнительных затрат: на покупку двигателя внутреннего сгорания с электрогенератором и подключение его к сети; на строительство линий электропередач, а то и трансформаторной подстанции; на прохождение определенных процедур для получения зеленого тарифа. Поэтому в некоторых случаях выгоднее использовать биогаз прямо в котельной предприятия для сокращения расхода или даже полной замены природного газа, который используется для внутренних нужд [2, 3].

В таблице приведены состав и другие характеристики для сравнения природного газа и биогаза с молочной фермы с. Большая Крупель (Киевская обл.). В качестве сырья для загрузки в биореакторы использовался коровий навоз. Составы биогаза и природного газа из городской сети определяли в Институте газа НАНУ на хроматографе Agilent 6890N.

Особенностями биогаза по сравнению с природным газом является пониженное содержание CH_4 — 50–75 % (в природном газе — 90–99 %) и наличие CO_2 в больших количествах (25–50 %). Поэтому использовать существующие горелочные устройства для природного газа в этом случае нельзя, так как для достижения такой же мощности через их сопловой аппарат нужно подать биогаза больше, чем природного, что невозможно без существенного увеличения давления перед горелкой. Увеличение скорости истечения биогаза нарушит оптимальное соотношение скоростей газ : воздух и соответственно изменит глубину проникновения струй биогаза в поток воздуха, что приводит, как правило, к большой вероятности срыва факела, повреждению горелки и топочных экранов котла. Если увеличить диаметр отверстий для истечения биогаза и соблюсти соотношение скоростей газ : воздух до предусмотренных конструкцией горелочного устройства, рассчитанного в соответствии с рекомендациями Ю.В.Иванова [4], для большинства конструкций горелочных устройств факел все равно будет неустойчив и склонен к отрыву. Это проис-

ходит из-за того, что у биогаза (БГ) ниже максимальная нормальная скорость распространения пламени ($u_{БГ} = 15–25$ см/с) по сравнению с природным газом (ПГ) ($u_{ПГ} = 38$ см/с). В первом приближении для практических задач максимальную нормальную скорость распространения пламени для биогаза (при $t = 20$ °С, $p = 101,325$ кПа) можно вычислить по эмпирической формуле:

$$u_{БГ} \approx 38 - 0,5 CO_2,$$

где CO_2 (%) — концентрация диоксида углерода в метано-диоксидуглеродной смеси (с прибавкой к нему не более 5 % других примесей, например, N_2).

Чем ниже нормальная скорость распространения пламени исходного биогаза, которая уменьшается с увеличением концентрации CO_2 , тем больше внимание надо уделять стабилизации факела, устраняя вероятность его срыва на всем рабочем диапазоне мощности горелочного устройства [2].

Еще одной причиной невозможности использования существующих горелочных устройств для природного газа при сжигании биогаза является наличие в биогазе высокотоксичных и коррозионно-активных примесей, в первую очередь, сероводорода, что требует применения специальных коррозионно-стойких сталей. Поэтому использование обычных газогорелочных устройств для сжигания биогаза может быть опасно из-за возможных повреждений металла.

Тем не менее, никаких принципиальных препятствий по сжиганию биогаза в существующих паровых и водогрейных котлах не имеется (кроме реконструкции или замены горелочных устройств). Сероводород при правильно выбранном горелочном устройстве сгорает в факеле, не достигая экранов топки котла (это не вызывает высокотемпературной сероводородной коррозии), образуя в результате реакции горения SO_2 и H_2O . Поскольку большинство паровых и водогрейных котлов являются газомазутными (в мазуте содержится некоторая часть серы [5], которая сгорает с образованием диоксида серы и на наличие которой котлы были рас-

Характеристики природного газа и биогаза

Газ	CH_4 , %	C_2H_6 , %	C_3H_8 , %	C_4H_{10} , %	C_5H_{12} , %	C_6H_6 , %	CO_2 , %	N_2 , %	O_2 , %	H_2S , %	u_n , см/с	ρ_r , кг/м ³	$Q_{нр}$, кДж/м ³
Природный	94,10	2,99	0,73	0,21	0,05	0,03	0,84	1,05	–	–	38	0,77	36757
Биогаз*	69,44	–	–	–	–	–	30,36	0,09	–	0,11	23	1,1	24941

Примечание. Расчетные величины: u_n — максимальная нормальная скорость распространения пламени подготовленной смеси ($t = 20$ °С, $p = 101,325$ кПа); ρ_r — плотность газа при нормальных условиях ($t = 0$ °С, $p = 101,325$ кПа); $Q_{нр}$ — низшая теплотворная способность газовой смеси.

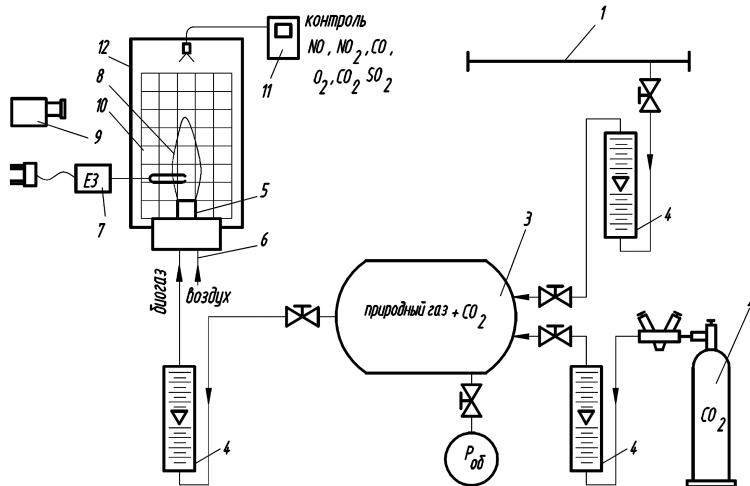


Рис.1. Лабораторный стенд для исследования процессов горения смеси ПГ и CO₂: 1 – магистраль ПГ; 2 – баллон с CO₂; 3 – резервуар-смеситель; 4 – ротаметр; 5 – горелка; 6 – воздух; 7 – электрозапальник; 8 – биогазовый факел; 9 – фотокамера; 10 – шкала; 11 – газоанализатор; 12 – камера сгорания.

считаны изначально), то никаких проблем при эксплуатации котлов, переведенных нами на сжигание биогаза, не наблюдалось, что подтверждается многолетним опытом эксплуатации паровых котлов ДКВР-6,5/13, ДКВР-10/13 и ДЕ-16/14 [2].

Возможной проблемой при сжигании биогаза в существующих котлах предполагали изменение длины факела [2] в случае, если биогазовый факел такой же тепловой мощности будет превышать максимальную для данной топки длину и может повредить задний или боковые экраны. Для проверки этого предположения на лабораторном стенде (рис.1) были проведены исследования влияния добавок CO₂ к природ-

ному газу (имитация биогаза, состав природного газа см. в таблице). Длина факела фиксировалась фотографированием на фоне размеченной шкалы и проверялась газоанализатором по составу продуктов сгорания.

Природный газ из магистрали 1 и диоксид углерода из баллона 2 подается в резервуар-смеситель 3 через ротаметры 4 в необходимой пропорции (процентное содержание газов в резервуаре проверяется газовым хроматографом), далее газ – имитатор биогаза – подают в горелку 5, воздух 6 подается в факел за счет разряжения. Электрозапальником 7 поджигают смесь, образовавшийся горящий факел 8 исследуют по высоте, фотографируя камерой 9 на фоне шкалы 10 и в том числе проводят анализ дымовых газов газоанализатором 11. Сгорание газа проходит в камере 12.

Зависимости длины факела от некоторых показателей для разных составов имитатора биогаза приведены на рис.2, 3. Как видно из рис.2, при разбавлении ПГ диоксидом углерода в количестве 11,7 % при переходе из ламинарного режима горения в турбулентный изменение длины факела не имеет четко выраженного экстремума, а длина факела природного газа изменяется по зависимости, близкой к полученной в работе Hottel H.C. и Howthorne W.R. [6].

На рис.3 показана длина факела, приведенная к одной и той же тепловой мощности, и видно, что по мере увеличения содержания CO₂ длина биогазового факела меньше, чем природного газа при истечении через насадку одного сечения.

В реальных промышленных установках в горелочных устройствах горение природного газа или биогаза начинается на некотором расстоянии от сопла, то есть имеет место горение оторванных газовых струй, в которые до начала горения инжектируется часть воздуха, необходимого для сгорания. Для таких струй сокращение длины факела смеси ПГ + CO₂ в сравнении с факелом природного газа можно частично объяснить увеличением количества движения струи смеси газов, так как плотность биогаза больше, чем природного газа ($m_{БГ} W > m_{ПГ} W$, где $m_{БГ}$, $m_{ПГ}$ – массы биогаза и природного газа, вытекающие через площадь сечения сопла в единицу времени при одинаковой скорости W) и степени инжекции теоретически необходимого количества воздуха. Коэффици-

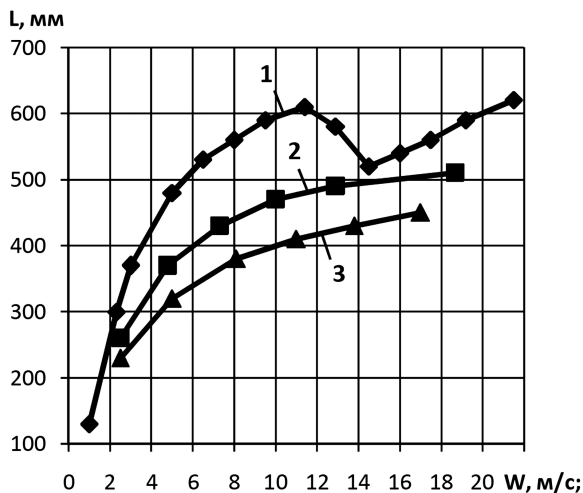


Рис.2. Зависимость длины факела от скорости выхода смеси при насадке диаметром 3 мм: 1 – ПГ; 2 – ПГ + 11,7 % CO₂; 3 – ПГ + 22 % CO₂.

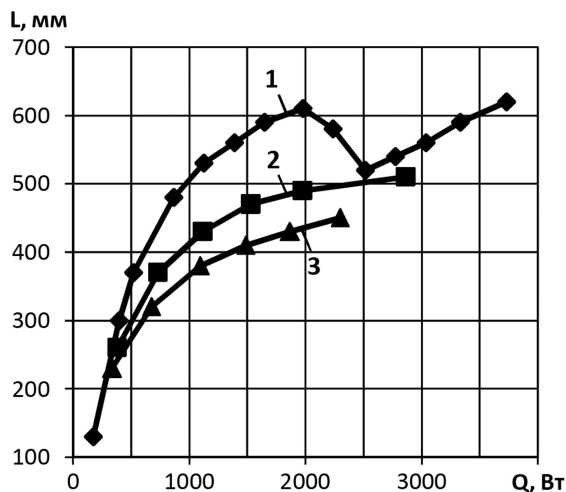


Рис.3. Зависимость длины факела от тепловой мощности при насадке диаметром 3 мм. Обозначения как на рис.2.

ент инъекции струи биогаза является функцией $K = f(m_{БГ} W_{БГ}; h_r)$, где h_r — расстояние от газового сопла до стенки воздушного канала.

Светимость биогазового факела ниже, чем природного газа. Это можно объяснить тем, что у биогазового меньшая теоретическая температура горения ($T_{ф}$), а степень подсоса теоретически необходимого для горения воздуха в струю биогаза выше, чем в струю природного газа.

Еще одной важной задачей при сжигании биогаза является изучение состава продуктов его сгорания с точки зрения наличия основных загрязняющих атмосферу веществ при горении газовых топлив.

Проведены исследования образования оксидов азота и монооксида углерода в зависимости от содержания CO_2 в газе — имитаторе биогаза при сжигании. Подготовленная смесь ($ПГ + CO_2$) вытекала из сопла диаметром 3 мм в кварцевый канал, где горение происходило в диффузионном факеле. Концентрации CO_2 , O_2 , NO_x , CO , а также температура фиксировались в выходном сечении кварцевого канала. Схема лабораторного стенда показана на рис.4, а результаты исследований — на рис.5.

Как видно из рис.5, при добавлении к природному газу 7 % CO_2 снижение выбросов оксидов азота уменьшается на 50–57 %, а эмиссия CO возрастает на 10–18 % от исходного. Удвоение балласта до 14 % приводит лишь к 62 %-му уменьшению NO_x , а увеличение выброса CO составляет около 55 %. Полученные данные коррелируются с другими исследованиями [7, 8], в которых целенаправленно балластировали топливо ($ПГ$) продуктами сгорания, содержащими CO_2 , с целью снижения выбросов NO_x котлом ТЭЦ. В качестве балласта природного газа использовали дымовые газы на реальных

горелочных устройствах котлоагрегата мощностью 100 т/ч пара. При добавлении каждого 1 % балласта в природный газ имело место снижение образования оксидов азота на 4,5–6 %. При добавлении 7 % газов рециркуляции снижение выброса NO_x составит 31,5–42 %, что немного меньше из-за различия составов балласта (преобладание в нем двухатомного газа (N_2)) и большей температуры балласта (дымовые газы подавались с температурой более 240 °С). Отсюда можно сделать вывод, что биогаз (забалластированный диоксидом углерода метан без значительных примесей H_2S) является более экологически чистым топливом по сравнению с природным газом.

В работах [9–11] показано, что добавление CO_2 к метану ($ПГ$) оказывает сильное влияние на температуру горения ($T_{ф}$) и скорость рас-

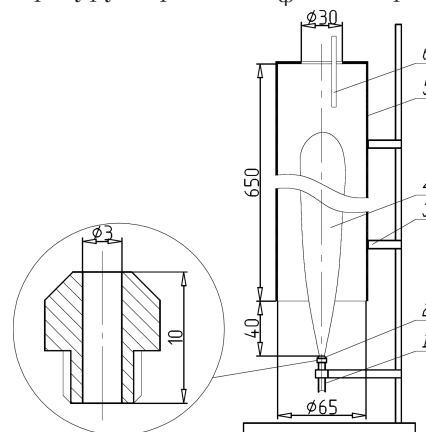


Рис.4. Кварцевый канал для исследования горения смеси $ПГ + CO_2$: 1 — подвод смеси $ПГ + CO_2$; 2 — насадка; 3 — штатив; 4 — факел; 5 — кварцевый канал; 6 — зонд газоанализатора.

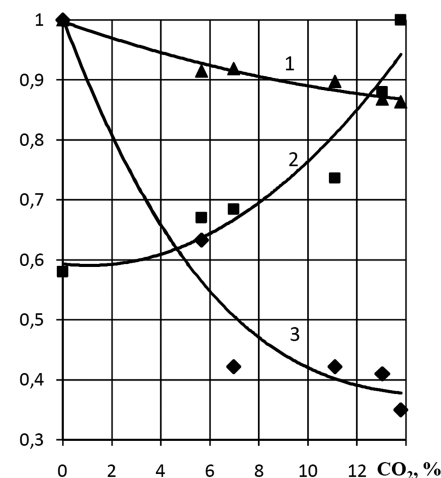


Рис.5. Изменение параметров горения при добавлении CO_2 к $ПГ$: 1 — безразмерной температуры (T/T_{max}); 2 — монооксида углерода (CO/CO_{max}); 3 — концентрации оксидов азота ($NO_x/NO_{x max}$).

пространения пламени (u_H) не только вследствие теплового, но и химического воздействия, в том числе из-за связывания атомов водорода по реакции $H + CO_2 \rightarrow CO + OH$.

В работе Н.А.Гуревича [11] подробно рассмотрено химическое воздействие CO_2 на скорость горения стехиометрической смеси метана с воздухом с использованием теории Я.Б.Зельдовича и показано, что влияние CO_2 превышает влияние H_2O , двухатомных газов (N_2), а также Ar и He в значительной мере из-за химической составляющей.

В работах сотрудников Института газа НАН Украины [12, 13] впервые в 1974 г. предложено ввести условный показатель токсичности продуктов сгорания газа (или любой газовой смеси) $\bar{\Gamma}_{усл}$, выбрасываемых в атмосферу, как сумму отношений концентраций данного токсичного вещества в продуктах сгорания (C_i) к его максимальной разовой предельно допустимой концентрации в атмосферном воздухе населенных мест ($ПДК_i$)_{м.р.} Для продуктов сгорания биогаза:

$$\begin{aligned} \Sigma \bar{\Gamma}_{усл} &\approx \bar{\Gamma}_{NO_x} + \bar{\Gamma}_{CO} + \bar{\Gamma}_{SO_x} \approx \\ &\approx C_{NO_x} / ПДК_{NO_x} + K_1 C_{CO} / ПДК_{CO} + \\ &+ K_2 C_{SO_x} / ПДК_{SO_x}, \end{aligned}$$

где $ПДК_{NO_x}$ (NO_x в пересчете на NO_2), $ПДК_{CO}$, $ПДК_{SO_x}$ (SO_x в пересчете на SO_2) – максимально разовые предельно допустимые концентрации, $ПДК_{NO_x} = 0,085$ мг/м³, $ПДК_{CO} = 5$ мг/м³; $ПДК_{SO_x} = 0,5$ мг/м³ [14]; K_1, K_2 – коэффициенты взаимного влияния (в нашем случае они близки к 1).

Например, для биогаза при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$ на реальном паровом котле ДКВР-6,5/13 этот выброс составит, мг/нм³: $NO_x = 100$; $CO = 120$; $SO_2 = 411$;

$$\begin{aligned} \Sigma \bar{\Gamma}_{усл.БГ} &\approx 100 / 0,085 + 1 \cdot 120 / 5 + \\ &+ 1 \cdot 411 / 0,5 = 2022. \end{aligned}$$

Для природного газа (в продуктах горения нет SO_2) массовый выброс NO_x зафиксирован в 2 раза больше, а CO в 2 раза меньше:

$$\Sigma \bar{\Gamma}_{усл.ПГ} \approx 200 / 0,085 + 1 \cdot 60 / 5 = 2364.$$

Как видно из приведенного примера, продукты горения биогаза по сравнению с природным газом являются более экологически безопасными даже с учетом наличия в них SO_2 .

В случае, если биогаз попадает в атмосферу без сжигания, то только за счет присутствия

в нем сероводорода интенсивность запаха повышается в сотни раз, а опасность для человека, находящегося в зоне эмиссии, по сравнению с диоксидом серы, который образуется в результате его сжигания, повышается в десятки раз:

$$\begin{aligned} \bar{\Gamma}_{H_2S} / \bar{\Gamma}_{SO_2} &= (G_{H_2S} / G_{SO_2}) \times \\ &\times (ПДК_{SO_2} / ПДК_{H_2S}) = \\ &= (34 / 64) (0,5 / 0,008) = 33 \text{ раза,} \end{aligned}$$

где G_{H_2S}, G_{SO_2} – молярные массы веществ, $G_{H_2S} = 34$ г/моль; $G_{SO_2} = 64$ г/моль; $ПДК_{SO_2}, ПДК_{H_2S}$ – максимально разовые предельно допустимые концентрации, $ПДК_{SO_2} = 0,5$ мг/м³, $ПДК_{H_2S} = 0,008$ мг/м³ [14].

Поэтому целесообразность сжигания биогаза в свечах, которое реализовано на некоторых объектах, где нет необходимости в горячей воде или электроэнергии (даже без полезного использования выделяемого тепла), объясняется значительным экологическим эффектом, в том числе за счет утилизации метана, который является парниковым газом.

Выводы

Биогаз является хорошим котельным топливом и может замещать природный газ в существующих котлах при условии реконструкции или замены имеющихся горелочных устройств.

Длина биогазового факела меньше, чем природного такой же тепловой мощности. Это объясняется рядом факторов, в том числе и тем, что биогазовые струи имеют большее количество движения и на одинаковых калибрах струи биогазовые инжектируют больше теоретически необходимого для горения воздуха.

Содержание оксидов азота в продуктах сгорания биогаза меньше в среднем на 50 % по сравнению с природным газом, что делает его более экологически безопасным топливом даже с учетом присутствия в части биогазов примеси сероводорода и повышения содержания монооксида углерода в 1,5–2 раза.

При сжигании биогаза особое внимание следует уделять стабилизации факела из-за склонности его к отрыву ввиду меньшей нормальной скорости распространения пламени.

При балластировании природного газа CO_2 (имитация биогаза) в количестве 12 % и более при переходе из ламинарного режима горения в турбулентный изменение длины факела не имеет четко выраженного экстремума, как это имеет место для природного газа.

Список литературы

1. Про внесення змін до Закону України «Про електроенергетику» щодо стимулювання виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії // Закон України № 5485-VI від 20.11.2012. — <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/5485-17>.
2. Сигал И.Я., Шекин А.Р., Домбровская Э.П., Марковский А.В., Куц В.П., Кернажицкая Е.С. Сжигание биогаза в промышленных котлах // Эко-технологии и ресурсосбережение. — 2002. — № 2. — С. 15–19.
3. Сигал И.Я., Гуревич Н.А., Хворов М.М., Домбровская Э.П. Источники выбросов метана в Украине и особенности утилизации биогаза // Эко-технологии и ресурсосбережение. — 2005. — № 3. — С. 33–41.
4. Иванов Ю.В. Газогорелочные устройства. — М. : Недра, 1972. — 276 с.
5. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). — СПб. : НПО Центр. котлотурбин. ин-т., 1998. — 256 с.
6. Hottel H.C., Howthorne W.R. Diffusion in laminar flame jets // Third symposium on combustion and flame and explosion phenomena. — 1949. — pp. 254–299.
7. Сигал И.Я., Дубоший О.М., Смихула А.В. Снижение выбросов оксидов азота котлами электростанций // Энергетика и электрификация. — 2005. — № 1. — С. 31–35.
8. Сигал И.Я., Дубоший А.Н., Сигал А.И., Смихула А.В. Повышение эффективности влияния рециркуляции дымовых газов на снижение выброса оксидов азота котлами электростанций // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2010. — № 1. — С. 48–52.
9. Galmiche B., Halter F., Foucher F., Dagaut P. Effects of Dilution on Laminar Burning Velocity of Premixed Methane/Air Flames // Energy and Fuels. — 2011. — Vol. 25. — P. 948–954.
10. Liu F., Guo H., Smallwood G. J. The Chemical Effect of CO₂ Replacement in Air on the Burning Velocity of CH₄ and H₂ Premixed Flames // Combustion and Flame. — 2003. — Vol. 133. — P. 495–497.
11. Гуревич Н.А. Химическое влияние добавки CO₂ на скорость горения метана по теории Зельдовича // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2011. — № 5. — С. 3–10.
12. Сигал И.Я., Гуревич Н.А. Оценка влияния различных источников газовых выбросов на загрязнение атмосферного воздуха // Укр. хим. журн. — 1974. — Т. 37, № 2. — С. 139–144.
13. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. — Л. : Недра, 1988. — 313 с.
14. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами) // Наказ МОЗ № 201 від 09.07.97. — <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=803>.

Поступила в редакцію 12.06.13

Сигал І.Я., докт. техн. наук, проф., **Сміхула А.В.**, канд. техн. наук, **Марасін О.В.**, аспірант, **Куць В.П.**, **Домбровська Е.П.**, канд. техн. наук, **Колчев В.О.**, **Кернажицька О.С.**

Інститут газу НАН України, Київ

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: isigal@ukr.net

Експериментальне дослідження біогазу як палива для котлів

На лабораторних вогневих стендах проведено дослідження горіння сумішей природного газу та діоксиду вуглецю (імітація біогазу). Показано, що біогаз є хорошим котельним паливом та може замінювати природний газ в існуючих котлах за умови реконструкції або заміни пальникових пристроїв. Експериментально визначено, що довжина біогазового факелу менша, ніж факелу природного газу такої самої теплової потужності. Токсичність викиду продуктів згорання біогазу менша, ніж природного газу. При спалюванні біогазу додаткову увагу треба приділяти стабілізації факелу через схильність його до відриву, зважаючи на меншу нормальну швидкість поширення полум'я. При баластуванні природного газу діоксидом вуглецю у кількості близько 12 % та більше не спостерігалось класичної тенденції зміни довжини факелу при переході з ламінарного режиму горіння в турбулентний, що характерно для природного газу. *Бібл. 14, рис. 5, табл. 1.*

Ключові слова: котли, горіння, біогаз, оксиди азоту, полум'я.

Sigal I. Ya., Doctor of Technical Science, Prof., **Smikhula A. V.**, Candidate of Technical Science, **Marasin O. V.**, PhD Student, **Kouts V. P.**, **Dombrowska E. P.**, Candidate of Technical Science, **Kolchev V. O.**, **Kernazhytska E. S.**

The Gas Institute of National Academy of Science of Ukraine, Kiev
39, Degtjarivska St., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: isigal@ukr.net

Experimental Research of a Biogas as a Fuel for Boilers

The researches of mixtures — natural gas and dioxide carbon (imitation of biogas) are conducted on laboratory fires stands. It is shown that a biogas is a good boiler fuel and can substitute natural gas in existent boilers on condition of reconstruction or replacement of burners. It is experimentally certain that length of biogas flame less than natural gas at the same power. The toxicity of fuel gases under biogas combustion is less than natural gas combustion. At biogas burning additional attention is necessary to be spared to flame stabilizing because of its inclination to tearing away, biogas has less high normal speed of flame distribution. At natural gas ballasting by carbon dioxide in an amount about 12 % and more the authors didn't observe classic tendency of flame length change which is characteristic for natural gas in transition from the laminar to turbulent regime burning. *Bibl. 14, Fig. 5, Table 1.*

Key words: boilers, burning, biogas, nitrogen oxides, flame.

References

1. Pro vnesennya zmin do Zakonu Ukrayini «Pro elektroenergetiku» shchodo stimulyuvannya virobnitstva elektroenergiyi z alternativnih dzherel energiyi. The Law of Ukraine № 5485-VI from 20.11.2012. (Ukr.). — <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/5485-17>.
2. Sigal I. Ya., Schekin A. R., Dombrowska E. P., Markovskiy A. V., Kouts V. P., Kernazhytska E. S. Burning biogas in industrial boilers. *Ekotehnologii i resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2002, (2), pp. 15–19. (Rus.)
3. Sigal I. Ya., Gurevich N. A., Hovorov M. M., Dombrowska E. P. Sources of methane emissions in Ukraine and features of biogas end-use. *Ekotehnologii i resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2005, (3), pp. 33–41. (Rus.)
4. Ivanov Yu. V. The gas burners. Moscow : Nedra Publ., 1972, 276 p. (Rus.)
5. Thermal calculation of boilers (Normative method). Saint-Petersburg : NPO Central'nyj kotloturbinnyj institut, 1998, 256 p. (Rus.)
6. Hottel H. C., Howthorne W. R. Diffusion in laminar flame jets. *Third symposium on combustion and flame and explosion phenomena*, 1949, pp. 254–299.
7. Sigal I. Ya., Duboshiy A. N., Smikhula A. V. . Reduction of emissions of nitrogen oxides by power boilers. *Energetika i elektrifikaciya*, 2005, (1), pp. 31–35. (Rus.)
8. Sigal I. Ya., Duboshiy A. N., Sigal O. I., Smikhula A. V. The efficiency increase of smoked gases recirculation influence on nitrogen oxides emission from power plant boilers reduction. *Energotehnologii i resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2010, (1), pp. 48–52. (Rus.)
9. Galmiche B., Halter F., Foucher F., Dagaut P. Effects of dilution on laminar burning velocity of premixed Methane/Air Flames. *Energy and Fuels*, 2011, 25, pp. 948–954.
10. Liu F., Guo H., Smallwood G. J. The chemical effect of CO₂ replacement in air on the burning velocity of CH₄ and H₂ premixed flames. *Combustion and Flame*, 2003, 133, pp. 495–497.
11. Gurevich N. A. The chemical effect of CO₂ addition on methane burning velocity by Zel'dovich theory. *Energotehnologii i resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2011, (5), pp. 3–10. (Rus.)
12. Sigal I. Ya., Gurevich N. A. Assessing the impact of different sources of gas emissions on air pollution. *Ukrainskiy himicheskij zhurnal [Ukrainian chemical journal]*, 1974, 37 (2), pp. 139–144. (Rus.)
13. Sigal I. Ya. . Protection of ambient air at fuel burning. Leningrad, Nedra Publ., 1988, 313 p. (Rus.)
14. Derzhavni sanitarni pravila ohoroni atmosferного povitrya naselenih mist (vid zabrudnennya himichnimi ta biologichnimi rehovinami). Nakaz MOZ № 201 from 09.07.97. (Ukr.) — <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=803>.