

вих потоків на результуючий температурний розподіл в апараті у процесі підігріву повітря. Переваги нового підходу до проектування рекуператорів, навіть не беручи до уваги зростання інтенсивності теплообміну з обох сторін теплообмінної поверхні, пояснюються суттєвим збільшенням області теплообміну (у разі рекуператора типу РРД) у порівнянні зі звичайними одноходовими радіаційними рекуператорами. Використання вторинних (проміжних) адіабатних випромінювачів у каналах для димових газів та повітря (чи потоків низькокалорійного газу) забезпечує додаткові можливості підвищення підігріву повітря (чи низькокалорійного газу). *Бібл. 11, рис. 8, табл. 2.*

Ключові слова: повітря горіння, ковпакова піч, коефіцієнт тепловіддачі, коефіцієнт теплопередачі, низькокалорійне паливо, протиток, прямоток, продукти згоряння, радіаційний рекуператор, температура теплоносія, тепловий потік.

УДК 621.18:632.15

Сигал І.Я., докт. техн. наук, проф., **Марасин А.В.**,
Смихула А.В., канд. техн. наук

Інститут газу НАН України, Київ

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: isigal@ukr.net

Газогорелочные устройства для сжигания биогаза в котлах

На основе проведенных ранее экспериментов впервые выведены критерии подобия для инженерного расчета горелочных устройств для сжигания биогаза, а также его сжигания совместно с природным газом. Установлено, что основное отличие биогаза от природного газа вызвано наличием в его составе более 30 % углекислого газа и его влиянием на плотность, теплотворность смеси газов и нормальную скорость распространения пламени. Показано, что без изменения конструкции и режимов подачи топлива сжигание биогаза в горелочных устройствах, разработанных для сжигания природного газа, практически не возможно. Рассмотрено несколько примеров горелочных устройств для работы на биогазе, рассчитанных для сжигания природного газа. Приведенные данные были положены в основу переоборудования горелочных устройств для совместного и раздельного сжигания биогаза и природного газа. *Библ. 7, рис. 2, табл. 2.*

Ключевые слова: биогаз, горелочные устройства, котлы, критерии подобия.

В последнее время использование биогаза в качестве топлива для промышленных котлов приобретает все большую актуальность. Это вызвано как минимум тремя причинами: 1) высокой стоимостью природного газа; 2) необходимостью очистки городских и промышленных сточных вод, в результате которой как остаточный продукт образуется биогаз; 3) усилением внимания к выбросу парниковых газов, в первую очередь CO_2 , CH_4 .

Котельный парк Украины насчитывает десятки тысяч котлов коммунального хозяйства, несколько тысяч котлов промышленности и электростанций, большинство которых оснаще-

но горелочными устройствами для сжигания природного газа. Использование биогаза в промышленных котлах в Украине крайне ограничено. При этом биогаз обычно подают в горелочные устройства, которые разработаны для природного газа. Реже применяются горелочные устройства, разработанные для сжигания биогаза, зарубежных фирм.

Рассмотрим возможность использования для сжигания биогаза существующих горелочных устройств, разработанных для сжигания природного газа.

В табл.1 приведены данные Института газа НАН Украины о составе биогаза различного

Таблица 1. Отличие состава биогаза от природного газа

Источник	Состав газа, % (об.)						Расчетные величины		
	CH ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ S	u _н , см/с	ρ _г , кг/м ³	Q _{нр} ^р , кДж/м ³
Природный газ									
	98	2	0,84	1,05	–	–	38	0,77	36757
Биогазы									
Городские очистные сооружения ¹	67,75	–	31,75	0,48	0,425	–	21	1,05	22412
Спиртзавод ²	69,3	–	30,2	0,2	0,3	–	23	1,1	24890
Животноводческая ферма ³	69,44	–	30,36	0,09	–	0,11	23	1,1	24941

Примечание. ¹ Бортническая станция аэрации ОАО «Киевводоканал» (Киевская обл.). ² Экспериментальный спиртзавод г. Лужаны (Черновицкая обл.). ³ Молочная ферма с. Большая Крупель (Киевская обл.).

происхождения, определенные на хроматографе Agilent 6890N. Из нее видно, что основное отличие биогаза от природного газа вызвано наличием в его составе более 30 % CO₂ и его влиянием на плотность (ρ), теплотворность смеси газов (Q_{нр}^р) и нормальную скорость распространения пламени (u_н) [1].

Нетрудно показать, что применение горелочных устройств для сжигания природного газа для работы на биогазе без изменения конструкции и режимов подачи топлива практически невозможно [2].

Рассмотрим два варианта.

1. Горелочное устройство остается неизменным, и давление биогаза равно давлению природного газа

Введем следующие критерии в виде приведенных ниже соотношений:

– скоростей биогаза и природного газа

$$\delta_w = W_{6.г} / W_{пр.г};$$

– расходов биогаза и природного газа

$$\delta_g = g_{6.г} / g_{пр.г};$$

– по теплу биогаза и природного газа

$$\delta_Q = Q_{6.г} / Q_{пр.г};$$

– дальности струй биогаза и природного газа

$$\delta_h = h_{6.г} / h_{пр.г};$$

– по теплу биогаза и природного газа

$$\delta_{D_{стр}} = D_{стр}^{6.г} / D_{стр}^{пр.г}.$$

В табл.2 приведены сравнительные характеристики существующих горелочных устройств

для природного газа при использовании их для сжигания биогаза (d_с^{б.г} = d_с^{пр.г} = const, P_{б.г} = P_{пр.г} = const). Из нее видно, что при использовании существующего горелочного устройства для природного газа с фиксированным диаметром сопел и давлением перед горелочным устройством (d_с = const, P_г = const) распределение струй в воздушном потоке резко нарушено (δ_h = 1,38), а производительность горелочного устройства по теплу снижается почти в 2 раза (δ_g = 0,524).

Таким образом, в табл.2 показано, что использование существующих горелочных устройств для природного газа под сжигание биогаза невозможно по следующим причинам: а) снижается мощность горелочного устройства почти в 1,9 раза; б) изменяются условия смешения струй газов с воздухом (h, D_{стр}).

Таблица 2. Характеристики горелочных устройств

Соотношение параметров	Уравнение	Результат
Скоростей выхода струй из сопел	δ _w = W _{6.г} / W _{пр.г}	0,81
Плотностей	δ _γ = γ _{6.г} / γ _{пр.г}	1,50
Расходов по топливу	δ _g = g _{6.г} / g _{пр.г}	0,81
Расходов по теплу	δ _Q = Q _{6.г} / Q _{пр.г}	0,524
Дальности струй	δ _h = h _{6.г} / h _{пр.г}	1,38
Диаметр струй	δ _{D_{стр}} = D _{стр} ^{6.г} / D _{стр} ^{пр.г}	1,38

2. Переоборудование горелочного устройства с природного газа на биогаз.

Важнейшей определяемой расчетной величиной при переводе котлов с природного газа на биогаз является диаметр сопловых отверстий d_с^{б.г}.

При переводе с природного газа на биогаз для обеспечения нужного расхода топлива диаметр сопловых отверстий горелочного устройства при постоянном давлении увеличивается в таком соотношении:

$$d_c^{б.г} = d_c^{пр.г} (\delta_w \delta_\gamma)^{-0,5}. \quad (1)$$

Например, для стандартного на природном газе сопла диаметр составляет 3 мм, эквивалентное сопло на биогазе будет иметь диаметр $d_c^{б.г} = 4,16$ мм.

При этом объем биогаза требуется подать больше в 1,5 раза:

$$v_{б.г} = \delta_w d_c^2. \quad (2)$$

Дальнобойность струи биогаза, вытекающей из сопла [3]:

$$h_{б.г} = d_c^{б.г} \sin \alpha k_s W_{б.г} / W_B (\gamma_{б.г} / \gamma_B)^{0,5}, \quad (3)$$

где h — расстояние, на котором струя принимает направление основного потока; $d_c^{б.г}$ — диаметр сопла биогаза; α — угол подъема закрученного потока воздуха; k_s — коэффициент, зависящий от шага сопел; $W_{б.г}$, W_B — скорости биогаза и воздуха; $\gamma_{б.г}$, γ_B — плотности биогаза и воздуха.

При переводе на биогаз дальнобойность струи биогаза будет в 1,38 раза больше, чем струи природного газа, что приводит к нарушению распределения струй в воздушном потоке, снижению и без того пониженной устойчивости горения и склонности к отрыву факела:

$$\delta_h = \delta_d \delta_w (\delta_\gamma^{б.г} / \delta_\gamma^{пр.г})^{0,5}. \quad (4)$$

Из рис.1 видно, что нормальная скорость распространения пламени биогаза $u_H^{б.г} = 21-23$ см/с, а природного газа $u_H^{пр.г} = 38$ см/с (см. табл.1) [4].

Соотношение дальнобойности струй природного газа и биогаза в значительной мере за-

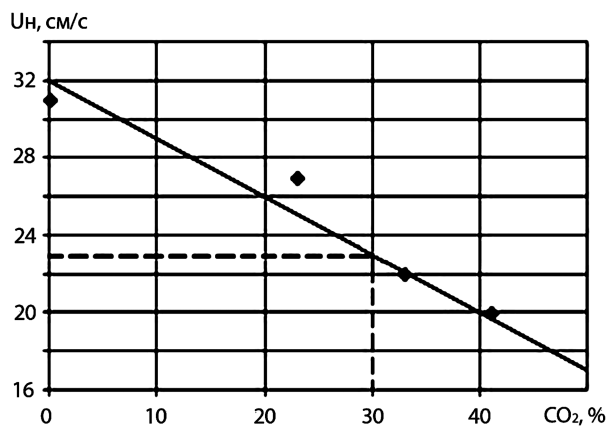


Рис.1. Скорость распространения пламени биогаза в зависимости от содержания CO_2 .

висит от диаметра сопла, соотношения скоростей и плотностей биогаза и природного газа (см. формулу (4)).

При переводе горелочных устройств природного газа на сжигание биогаза следует учитывать, что нормальная скорость распространения пламени биогаза существенно ниже, чем при сжигании природного газа ($u_H^{б.г} < u_H^{пр.г}$):

$$u_H^{б.г} \approx u_H^{пр.г} [100 - 1,6 CO_2 - 1,3 H_2O - 0,8 (N_2 + O_2)]. \quad (5)$$

Вышеприведенные данные были положены в основу переоборудования горелочных устройств для совместного и раздельного сжигания биогаза и природного газа.

В связи с особенностями процесса получения биогаза объемы его не всегда постоянные. Для обеспечения надежного теплоснабжения рекомендуются горелочные устройства, позволяющие обеспечить работу котла на биогазе или на природном газе, а также наладить правильный процесс горения в котле при одновременном сжигании биогаза и природного газа в одном топочном устройстве (по мере необходимости).

В Институте газа НАН Украины с 2000 г. по настоящее время были разработаны, исследованы в лаборатории и внедрены в промышленности два типа газогорелочных устройств для сжигания биогаза: 1) подовые горелочные устройства для котлов ДКВР-6,5 и ДКВР-10; 2) вихревые горелочные устройства для сжигания биогаза и природного газа в котлах ДЕ-16. Схемы переоборудованных котлов для совместного сжигания биогаза и природного газа приведены на рис.2.

Кроме того, были также разработаны вихревые горелочные устройства для совместного

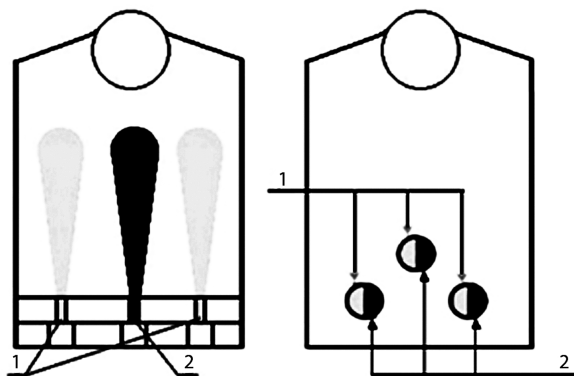


Рис.2. Схемы котлов ДКВР-6,5 (а) и ДКВР-20 (б) в режиме совместного сжигания биогаза (1) и природного газа (2) в подовых (а) и в вихревых (б) горелочных устройствах.

сжигания биогаза и природного газа в котлах ДКВР-20 [5, 6].

Впервые в отечественной практике были разработаны, изготовлены горелочные устройства для сжигания биогаза и совместного сжигания с природным газом.

Выводы

Использование биогаза в котлах имеет существенное значение для некоторых предприятий Украины: станций аэрации, сахарных, спиртовых, мясо-молочных и других фабрик, заводов, в которых биогазом можно заменить 20–100 % потребляемого природного газа.

Впервые введены критерии для инженерных расчетов горелочных устройств для сжигания биогаза.

Основным недостатком сжигания биогаза в топках мощных агрегатов есть нестабильность объемов получаемого топлива, суженные границы регулирования горения биогаза.

Для обеспечения надежности в связи с изменяющимся количеством получаемого биогаза желательно иметь надежное теплоснабжение и возможность работы котлов и на природном газе, и на биогазе.

Разработаны, внедрены в промышленность и проверены в длительной эксплуатации схемы работы котла ДКВР-6,5 при работе одного центрального подового горелочного устройства на

природном газе и двух крайних подовых горелочных устройств на биогазе, а также ДЕ-16 на вихревом газогорелочном устройстве для совместного одновременного сжигания биогаза и природного газа.

Список литературы

1. Сигал И.Я. Сжигание газа в котлах и защита воздушного бассейна // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2009. — № 4. — С. 26–34.
2. Иванов Ю.В. Газогорелочные устройства. — М. : Недра, 1972. — 276 с.
3. Комина Г.П., Володин С.Е., Шахов Г.С. Использование биогаза в котельной очистных канализационных сооружений // Термокаталитическая очистка и снижение токсичных выбросов в атмосферу. — Киев : Наук. думка, 1989. — С. 105–109.
4. Сигал И.Я., Марасин А.В., Смихула А.В., Сигал А.И., Колчев В.А. Экспериментальное исследование горения биогаза и его использование в промышленных котлах // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. — 2013. — № 17. — 84–89.
5. Сигал И.Я., Марасин А.В., Бражник В.С., Колчев В.А., Сигал А.А. Особенности использования биогаза, получаемого на очистных сооружениях, в качестве топлива для котлов // Экология и промышленность. — 2014. — № 2. — С. 17–23.
6. Пат. 89870 Укр., МПК (2009) F 23 D 14/00. Пальниковий пристрій для спільного спалювання природного газу і біогазу / І.Я.Сігал, О.І.Сігал, В.О.Колчев. — Опубл. 10.03.10, Бюл. № 5.

Поступила в редакцию 07.08.14

Сігал І.Я., докт. техн. наук, проф.,
Марасін О.В., Сміхула А.В., канд. техн. наук

Інститут газу НАН України, Київ

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

Газопальникові пристрої для спалювання біогазу в котлах

На основі проведених раніше експериментів вперше виведено критерії подібності для інженерного розрахунку пальникових пристроїв для спалювання біогазу, а також його спалювання спільно з природним газом. Встановлено, що основну відмінність біогазу від природного газу зумовлено наявністю в його складі більше 30 % вуглекислого газу та його впливом на щільність, теплотворність суміші газів та нормальну швидкість поширення полум'я. Показано, що без зміни конструкції та режимів подачі палива спалювання біогазу в пальникових пристроях, розроблених для спалювання природного газу, практично не можливо. Розглянуто декілька прикладів пальникових пристроїв для роботи на біогазі, що було розраховано для спалювання природного газу. Наведені дані було покладено в основу переобладнання пальникових пристроїв для спільного та роздільного спалювання біогазу та природного газу. *Бібл. 7, рис. 2, табл. 2.*

Ключові слова: біогаз, пальникові пристрої, котли, критерії подібності.

Sigal I. Ya., Doctor of Technical Science, Professor,
Marasin O. V., **Smikhula A. V.**, Candidate of Technical Science
The Gas Institute of National Academy of Science of Ukraine, Kiev
 39, Degtjarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: isigal@ukr.net

Gas Burners for Combustion of Biogas in Boilers

On the basis of earlier experiments was first derived criteria of similarity for engineering design of burners for biogas combustion and co-combustion with natural gas. It was established that the main difference of biogas from natural gas is the presence of more than 30 % of carbon dioxide and its effect on the density, calorific value of the gas mixture and the burning velocity. It was shown that without changing the design and modes of fuel supply biogas combustion in burners designed to combustion natural gas, is almost impossible. Several examples were considered for burners designed for natural gas combustion when operating on biogas. These data were the basis for the conversion burners for joint and separate combustion of biogas and natural gas. *Bibl. 7, Fig. 2, Table 2.*

Key words: biogas, burners, industrial boilers, similarity criteria.

References

1. Sigal I. Ya. Szhiganie gaza v kotlah i zaschita vozdušnogo basseyna. *Energotehnologii i resurso-sberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2009, (4), pp. 26–34. (Rus.)
2. Ivanov Yu. V. Gazogorelochnyye ustroystva. Moscow : Nedra, 1972, 276 p. (Rus.)
3. Komina G. P., Volodin S. E., Shahov G. S. Ispolzovanie biogaza v kotelnoy ochistnykh kanalizatsionnykh sooruzheniy. In: Termokataliticheskaya ochistka i snizhenie toksichnykh vyibrosov v atmosferu. Kiev : Naukova dumka, 1989, pp. 105–109. (Rus.)
4. Sigal I. Ya., Marasin A. V., Smikhula A. V., Sigal O. I., Kolchev V. O. Eksperimentalnoe issledovanie gorennya biogaza i ego ispolzovanie v promyshlennykh kotlah. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2013, (17), pp. 84–89. (Rus.)
5. Sigal I. Ya., Marasin A. V., Brazhnik V. S., Kolchev V. O., Sigal O. O. Osobennosti ispolzovaniya biogaza, poluchaemogo na ochistnykh sooruzheniyah, v kachestve topliva dlya kotlov. *Ekologiya i promyshlennost*, 2014, (2), pp. 17–23. (Rus.)
6. Pat. 89870 Ukr., MPK F 23 D 14/00. Pal'nykovyj prystrij dlja spil'nogo spaljuvannja pryrodnogo gazu i biogazu / I. Ya. Sigal, O. I. Sigal, V. O. Kolchev. – Opubl. 10.03.10, Bjul. №5.

Received August 7, 2014