



УДК 621.18:632.15:628.31

И.Я. СИГАЛ, докт. техн. наук, профессор, заведующий отделом, **А.В. МАРАСИН**, младший научный сотрудник
Институт газа НАН Украины, г. Киев

В.С. БРАЖНИК, директор

Бортническая станция аэрации ПАО «АК «Киевводоканал», г. Киев

А.В. СМИХУЛА, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, **В.А. КОЛЧЕВ**, научный сотрудник
Институт газа НАН Украины, г. Киев

А.А. СИГАЛ, студент

Национальный технический университет Украины «КПИ» (НТУУ «КПИ»), г. Киев

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОГАЗА, ПОЛУЧАЕМОГО НА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ, В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА ДЛЯ КОТЛОВ

Проведен анализ существующего положения в решении проблемы получения и использования биогаза на очистных сооружениях городов Украины, дана оценка потенциала газообразования на таких сооружениях, рассмотрены перспективы развития биогазовых технологий. Показано, что биогаз можно использовать в качестве топлива для котлов очистных сооружений, при этом существует возможность частичного либо полного замещения потребляемого природного газа. Представлены схема улучшения работы Бортнической станции аэрации, а также разработанные Институтом газа НАН Украины горелочные устройства для совместного сжигания биогаза и природного газа.

Ключевые слова: очистные сооружения, биогаз, природный газ, котлы, горение, оксиды азота.

В связи с ростом стоимости природного газа все больший интерес вызывает использование в качестве альтернативного топлива биогаза, производимого на городских очистных сооружениях. В настоящее время использование биогаза еще не получило широкого распространения (в основном из-за того, что это требует больших капитальных вложений). Однако у авторов уже имеется значительный опыт использования биогаза не только в котлах малой мощности (до 1 МВт), но и в промышленных котлах (мощностью от 4 до 20 МВт).

Результатом роста численности населения больших городов является увеличение объема сточных вод, в связи с чем вопрос их очистки в соответствии с требованиями экологических норм становится весьма актуальным. К тому же завершающей стадией очистки городских сточных вод является производство биогаза на очистных сооружениях. Учитывая это, еще в 1980 г. были приняты планы ввода в эксплуатацию первой очереди систем получения и использования биогаза в восьми крупных городах Украины. Однако до настоящего времени они практически не выполнены. Единственная система использования биогаза очистных сооружений работает на Бортнической станции аэрации (г. Киев), при этом она нуждается в усовершенствовании (в т.ч. в реконструкции системы сжигания биогаза в котлах).

В Украине пять городов имеют население более миллиона человек (Киев – 2,85 млн; Харьков – 1,45 млн; Одесса, Днепропетровск, Донецк – около 1 млн) и шесть городов – от 0,4 до 1 млн (Запорожье, Кривой Рог, Львов, Николаев, Мариуполь и Луганск). Общая численность населения крупных городов Украины составляет около 11 млн. Возможные объемы получения биогаза на очистных сооружениях этих городов приведены в табл. 1.

Биогаз – хорошее топливо для котлов. Его особенностью является пониженное (60–75 %) содержание метана (в природном газе 90–99 % CH_4), что связано с наличием значительного количества (25–40 %) диоксида углерода. Благодаря этому сжигание биогаза происходит с минимальным образованием оксидов азота [1]. Сравнительные характеристики природного газа и биогаза очистных сооружений Бортнической станции аэрации приведены в табл. 2.

Добавление CO_2 к природному газу приводит к уменьшению нормальной скорости распространения пламени и сужению пределов устойчивости горения (табл. 3) [2]. Кроме того, влияние CO_2 на скорость распространения пламени имеет не только физическую, но и химическую составляющую [3]. Исследования, проведенные на экспериментальном стенде, показали, что добавление CO_2 к природному газу (имитация биогаза) не только

Таблица 1 – Возможные объемы получения биогаза на очистных сооружениях крупных городов Украины

Город	Количество жителей, тыс. чел.	Средний объем сточных вод, млн м ³ /год	Объем ила, млн м ³ /год	Потенциальный выход биогаза, млн м ³ /год
Киев	2 845	350	1	12(3*)
Харьков	1 451	179	0,5	6,1
Одесса	1 015	125	0,4	4,3
Днепропетровск	998	123	0,4	4,2
Донецк	953	117	0,3	4,0
Запорожье	770	95	0,3	3,3
Львов	730	90	0,3	3,1
Кривой Рог	656	81	0,2	2,8
Николаев	496	61	0,2	2,1
Мариуполь	462	57	0,2	1,9
Луганск	426	52	0,1	1,8
Всего	10 802	1 329	3,8	46,0

* получено на входе в котельную

Таблица 2 – Сравнительные характеристики природного газа и биогаза Бортичской станции аэрации (г. Киев)

№ метантенка	Состав, %										Плотность, кг/м ³	Теплотворная способность, ккал/м ³
	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂	H ₂ S	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂		
Природный газ												
	92,81	1,23	–	1,23	–	–	3,7	0,78	0,15	0,1	0,73	8550
Биогаз												
1	66,12	32,72	0,46	0,55	0,12	0,03	–	–	–	–	1,13	5284
2	67,73	31,39	0,22	0,53	0,1	0,03	–	–	–	–	1,12	5412
3	67,34	31,72	0,35	0,45	0,11	0,03	–	–	–	–	1,12	5381
4	67,76	31,06	0,44	0,57	0,13	0,04	–	–	–	–	1,11	5415

не увеличивает, а даже уменьшает длину факела, что позволяет использовать биогаз в топках существующих котлов без их изменения при соответствующей реконструкции горелочных устройств [4].

Таблица 3 – Характеристики устойчивости горения биогаза

Показатель	CO ₂ , %			
	0	20	30	40
Максимальная нормальная скорость распространения пламени в подготовленной смеси U _н , см/с	38,0	28,3	23,7	19,2
Концентрационная граница воспламенения биогаза верхняя L _в , %	15	16	17	18
Концентрационная граница воспламенения биогаза нижняя L _н , %	5	6,5	7,2	8
Отношение концентрационных границ воспламенения биогаза L _в /L _н	3	2,4	2,3	2,25

Биогаз значительно отличается по своим физико-химическим свойствам от природного газа, что не позволяет сжигать его в горелочных устройствах, предназначенных для природного газа. Это подтверждает основной показатель взаимозаменяемости газов – число Воббе, значение которого для биогаза отличается от значения

для природного газа почти на 60 % (стандарты допускают отклонение значений числа Воббе у взаимозаменяемых газов не более чем на 5 %). Следовательно, для одновременного сжигания природного газа и биогаза нужно применять специальные горелочные устройства [5].

Таким образом, использовать существующие горелочные устройства, разработанные для природного газа, нельзя, так как для достижения требуемой мощности через сопловой аппарат устройства нужно подать биогаза больше, чем природного газа, что невозможно без существенного увеличения давления перед горелкой. С ростом давления увеличивается скорость истечения биогаза, нарушается оптимальное соотношение скоростей газ – воздух и, соответственно, изменяется глубина проникновения струй биогаза в поток воздуха, что приводит к нарушению режима работы горелочного устройства и срыву факела. Для большинства конструкций горелочных устройств факел будет неустойчив и склонен к отрыву, даже если увеличить диаметр отверстий для подачи биогаза и соблюдать соотношение скоростей газ – воздух, рассчитанное в соответствии с рекомендациями [6]. Это происходит из-за того, что у биогаза ниже нормальная скорость распространения пламени (u_{гр} = 15–25 см/с), чем у природного газа



($u_{пр} \approx 38$ см/с). В первом приближении для практических задач можно определить нормальную скорость распространения пламени для биогаза (при температуре $t = 20$ °С и давлении $p = 101,325$ кПа) по эмпирической формуле

$$u_{бр} \approx 38 - 0,5 \cdot CO_2, \text{ см/с}, \quad (1)$$

где $CO_2, \%$ – концентрация диоксида углерода в биогазе (при наличии азота в количестве, не превышающем 5 %, этот показатель суммируют с процентным содержанием CO_2) [4].

Для того чтобы получать биогаз на городских очистных сооружениях (табл. 1), необходимо построить метантенки, а в некоторых городах – и новые очистные сооружения.

Следует отметить, что производство биогаза позволяет не только заместить часть природного газа, используемого на предприятиях по очистке городских стоков, но и решить ряд сопутствующих задач:

- уменьшить массу органических веществ путем их биологической деструкции с образованием биогаза;
- снизить антропогенную нагрузку на окружающую природную среду за счет сокращения выбросов в атмосферу вредных органических соединений;
- уменьшить парниковый эффект за счет сжигания получаемого биогаза в котлах, двигателях внутреннего сгорания или свечах аварийного дожига (перевод CH_4 в CO_2 снижает парниковый эффект в 5,5 раза);
- обеспечить частично электроэнергией очистные сооружения.

На Бортнической станции аэрации применяется классическая схема обработки сточных вод, которая предусматривает механическую (решетки, песколовки, первичные отстойники) и биологическую очистку (метантенки, аэротенки и вторичные отстойники) на всех блоках очистных сооружений. Среднегодовой эффект от внедрения очистки составляет: по взвешенным веществам – 93,2 % (в поступающих стоках – 193,4 мг/л, после биологической очистки – 13,2 мг/л); по БПК₅ – 96,2 % (в поступающих стоках – 136,4 м O_2 /л, после биологической очистки – 5,2 мг O_2 /л) [7].

Система производства и использования биогаза на Бортнической станции аэрации работает следующим образом: биогаз из метантенков поступает в газгольдеры, где он накапливается, а затем подается в котельную для сжигания в котле ДКВР-6,5/13, оборудованном специальными подовыми горелками, разработанными и изготовленными в Институте газа НАНУ. Большая часть биогаза (80 %) подается на сжигание в горелки котла ДКВР-20/13 (рис. 1).

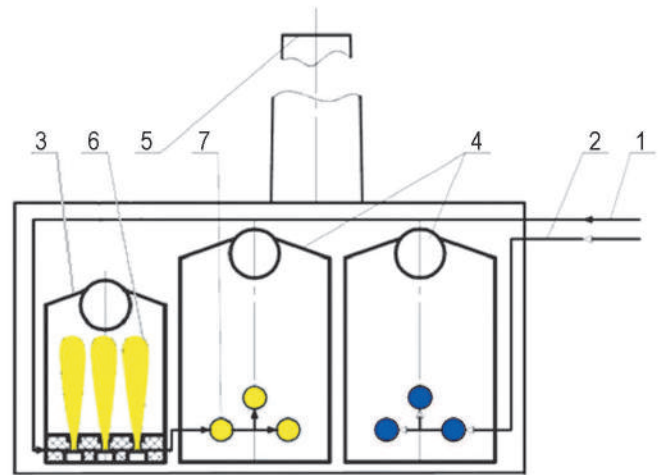


Рисунок 1 – Схема работы котельной Бортнической станции аэрации до реконструкции котлов:

- 1 – биогазопровод от газгольдера; 2 – газопровод от ГРП;
- 3 – паровой котел первой очереди ДКВР-6,5/13; 4 – паровые котлы второй очереди ДКВР-20/13; 5 – дымовая труба;
- 6 – подовые биогазовые горелки котлов ДКВР-6,5/13;
- 7 – штатные горелки ГМГБ-6,5

Мощности котла первой очереди ДКВР-6,5/13 достаточно для работы на биогазе летом, но недостаточно для работы зимой. Это связано с тем, что летом выход биогаза минимальный, а зимой – максимальный. Поэтому в зимнем режиме один из котлов ДКВР-20/13 работает исключительно на природном газе, а второй – на биогазе (т.е. когда биогаза достаточно, на нем работает только один котел). Если газгольдеры пустые, этот котел выключается и запускается ДКВР-20/13 на природном газе. Такие циклические нагрузки на котлы приводят к ускоренному сокращению ресурса их работоспособности. Кроме того, существует проблема с сокращением ресурса газгольдеров и метантенков. В результате на участке метантенк – газгольдер – котельная теряется значительная часть биогаза (по нашим предварительным расчетам – до 30 %).

Бортнической станцией аэрации совместно с Институтом газа НАНУ разработан новый безгазгольдерный цикл подачи и сжигания биогаза. Преимущества работы по такой схеме (рис. 2):

- а) сохраняется ресурс обоих котлов ДКВР-20/13 за счет существенного уменьшения годовых пусков и остановок, постоянно работает только один котел;
- б) увеличивается поступление биогаза в котельную из-за уменьшения его потерь на тракте метантенк – горелка;
- в) обеспечивается возможность использования для работы в летнем режиме только одного котла ДКВР-6,5/13, причем при отсутствии биогаза этот же котел может работать на природном газе.

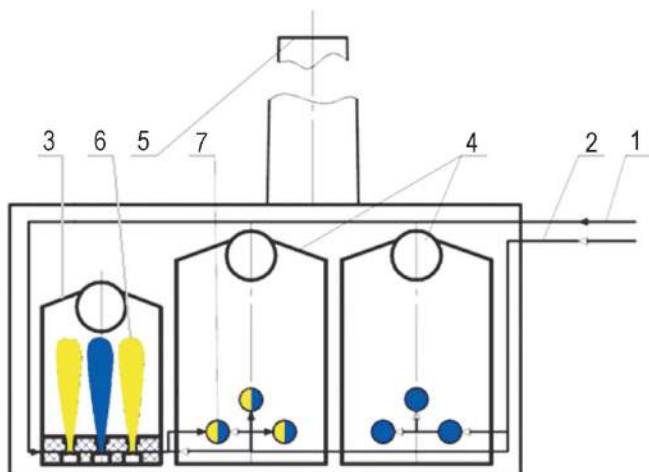


Рисунок 2 – Схема работы котельной Бортнической станции азрации после реконструкции котлов:

- 1 – биогазопровод от биореакторов; 2 – газопровод от ГРП;
- 3 – паровой котел первой очереди ДКВР-6,5/13; 4 – паровые котлы второй очереди ДКВР-20/13; 5 – дымовая труба;
- 6 – подовые горелки котлов ДКВР-6,5/13; 7 – штатные горелки ГМГБ-6,5

Чтобы оптимизировать работу котла ДКВР-6,5/13 с подовыми горелками, необходимо предусмотреть возможность его работы в летнем режиме как на биогазе, так и на природном газе. С этой целью Институтом газа НАНУ разработаны два типа подовых горелок (рис. 3), отличающихся размерами сопел и воздухораспределителями, при этом две горелки предназначены для сжигания биогаза (на них будет выдерживаться номинальная нагрузка котла) и одна, центральная, оборудована для работы на природном газе (она рассчитана на 30 % паропроизводительности котла).

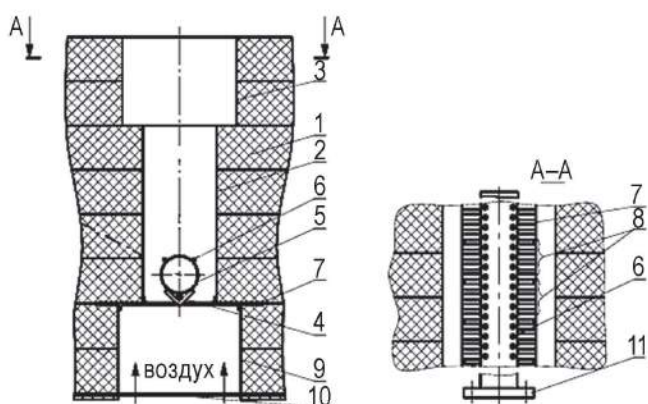


Рисунок 3 – Горелка для сжигания биогаза или природного газа:

- 1 – керамическая кладка; 2 – щель из керамической кладки;
- 3 – внезапное расширение; 4 – крепление коллектора;
- 5 – коллектор для биогаза или природного газа; 6 – газовые сопла; 7 – дополнительный воздухораспределитель;
- 8 – воздухораспределитель; 9 – воздушная камера

Проблемы с одновременным сжиганием природного газа и биогаза в промышленных паровых котлах на станциях азрации возникли еще во время проектирования подобных станций азрации в СССР. Например, при недостаточном образовании биогаза предлагалось добавлять в биогазопровод природный газ и сжигать газовую смесь в существующих горелках [8]. Однако при использовании такого способа существенно уменьшается диапазон регулирования горелки – из-за существенного различия плотности природного газа ($0,73 \text{ кг/м}^3$) и биогаза ($1,0\text{--}1,2 \text{ кг/м}^3$). Обеспечить требуемую тепловую нагрузку котла при одинаковом давлении природного газа и биогаза в газопроводе и перед горелкой невозможно, а нормальная скорость распространения пламени такой смеси может изменяться в два раза, что увеличивает вероятность срывов пламени и возникновения пульсаций. Поэтому Институтом газа НАНУ и Бортнической станцией азрации предложено другое решение указанной проблемы – подключение к котлу двух независимых газопроводов для природного газа и биогаза (причем каждый газ подается в свой коллектор, а оттуда струями – в топочную камеру). Пример горелочного устройства такой конструкции приведен на рис. 4.

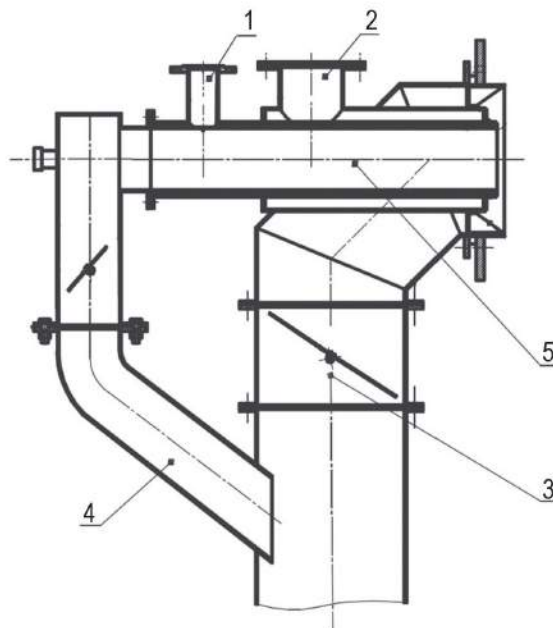


Рисунок 4 – Схема горелки мощностью 6 МВт для котла ДКВР-20/13, содержащего три горелки, каждая из которых может работать одновременно на природном газе и биогазе:

- 1 – биогазовый коллектор; 2 – коллектор для природного газа; 3 – подвод основного воздуха; 4 – подвод вторичного воздуха; 5 – центральный канал вторичного воздуха

Предлагается усовершенствованная схема работы котельной с построением линии байпаса от метантенков



напрямую в котельную, минуя газгольдеры. Это позволяет исключить газгольдеры из работы и устранить потери биогаза, связанные с аварийным состоянием газгольдеров и метантенков. Биогаз с любым давлением будет поступать в котел ДКВР-20/13, оборудованный специальными комбинированными горелочными устройствами, которые работают одновременно на биогазе и природном газе (рис. 4), или в ДКВР-6,5/13 с горелками для сжигания биогаза и природного газа (рис. 3). Таким образом, биогаз поступает в один из котлов (ДКВР-20/13 или ДКВР-6,5/13), а необходимую нагрузку поддерживают благодаря подаче в горелку этого котла природного газа. Таким образом, в работе постоянно находится только один котел (остальные – в резерве).

Другой вариант горелочного устройства для одновременного сжигания биогаза и природного газа в котле ДЕ-16 был разработан Институтом газа НАНУ и введен в эксплуатацию на Лужанском спиртзаводе (п.г.т. Лужаны, Черновицкая обл.). Кроме того, был выполнен проект перевода котлов на биогаз, разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию подовые горелочные устройства на биогазе в котле ДКВР-10 на спиртзаводе «Брынцалов А» (г. Электрогорск, Московская обл.), а также печи и свечи аварийного дожига, огнепреградители и влагоуловители на этих предприятиях.

ВЫВОДЫ

1. Институтом газа НАНУ разработаны, внедрены и эксплуатируются в течение 10 лет на предприятиях Украины и России в промышленных котлах ДКВР-6,5, ДКВР-10 и ДЕ-16 подовые и вихревые горелочные устройства производительностью 2–12 МВт для сжигания биогаза и природного газа.

2. Разработан упрощенный цикл использования биогаза путем исключения газгольдеров.

3. На основании исследований Института газа НАНУ созданы горелочные устройства котлов ДКВР-20, ДЕ-16 для осуществления совместного сжигания биогаза

и природного газа в одном комбинированном газогорелочном устройстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сжигание биогаза в промышленных котлах / И. Я. Сигал, А. Р. Щекин, Э. П. Домбровская, А. В. Марковский, В. П. Куц, Е. С. Кернажицкая // Экологические и ресурсосбережение. – 2002. – № 2. – С. 15–19.
2. Сигал И. Я. Сжигание газа в котлах и защита воздушного бассейна / И. Я. Сигал // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2009. – № 4. – С. 26–34.
3. Гуревич Н. А. Химическое влияние добавки CO_2 на скорость горения метана по теории Зельдовича / Н. А. Гуревич // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2011. – № 5. – С. 3–10.
4. Экспериментальное исследование биогаза как топлива для существующих котлов / И. Я. Сигал, А. В. Смихула, А. В. Марасин [и др.] // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2013. – № 5. – С. 26–32.
5. Комина Г. П. Использование биогаза в котельной очистных канализационных сооружений / Г. П. Комина, С. Е. Володин, Г. С. Шахов // Термокаталитическая очистка и снижение токсичных выбросов в атмосферу: сб. науч. трудов. – К.: Наукова думка, 1989. – С. 105–109.
6. Иванов Ю. В. Газогорелочные устройства / Ю. В. Иванов. – М.: Недра, 1972. – 276 с.
7. Взаємодія мікробних популяцій у метаногенних асоціаціях і шляхи збільшення виходу метану в метантенках / В. І. Карпенко, Л. С. Ястремська, Л. П. Голодок, І. Г. Бурун, Я. В. Лембей, О. С. Голубев // Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія. – 2006. – Вип. 14, Т. 1. – С. 80–85.
8. А.с. 981760 СССР, МПК F23G7/06. Способ утилизации газа станций аэрации / Ю. С. Гайстер, В. П. Иванов, М. А. Лалир, И. Р. Лобзин, М. А. Маевский, А. С. Хорьков, Ю. В. Яровой. – № 3275790; заявл. 16.01.81; опубл. 15.12.82, Бюл. № 46. – 5 с.: ил.

Поступила в редакцию 02.04.2014

Проведено аналіз наявного стану у вирішенні проблеми отримання і використання біогазу на очисних спорудах міст України, надано оцінку потенціалу газотворення на таких спорудах, розглянуто перспективи розвитку біогазових технологій. Показано, що біогаз можна використовувати як паливо для котлів очисних споруд, при цьому існує можливість часткового або повного заміщення споживаного природного газу. Надано схему покращення роботи Бортницької станції аерації, а також розроблені Институтом газу НАН України пальники для спільного спалювання біогазу і природного газу.

One be analyzed existing situation in problem solution for obtain and use of biogas at treatment units of Ukraine's cities, one be given estimation for potential of gas forming at these units, one be examined development prospects for biogas technologies. One be shown that biogas can be used as fuel for boilers of treatment units, and it is possible to replace consumed natural gas partially or fully. One be provided scheme for operation upgrading of Bortnichy aeration station and burner units for combined burning of biogas and natural gas developed by Gas Institute, National Academy of Sciences of Ukraine.