

Топливо и энергетика

УДК 662.767.2:628.472.3

Жук Г.В., докт. техн. наук, **Пятничко А.И.,** канд. техн. наук,
Кубенко С.Б., Иванов Ю.В., Крушневич С.П.,
канд. техн. наук, **Федоренко Д.С.**

Институт газа НАН Украины, Киев

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

Комплексная утилизация свалочного газа полигонов твердых бытовых отходов Украины

Проведен системный анализ полигонов твердых бытовых отходов крупных городов Украины. Разработаны научные основы и методология создания систем утилизации биогаза в энергетических установках, а также комплексные технологии сбора, подготовки и использования биогаза с выработкой электроэнергии, тепла, биометана (аналога природного газа) и углекислоты, их хранения и поставки потребителям в виде гидратов безтрубопроводным транспортом. Разработаны проекты и внедрены на полигонах твердых бытовых отходов промышленные комплексы по защите атмосферы от парниковых газов, их утилизации с выработкой электроэнергии общей мощностью 5,2 МВт для централизованной электросети. Внедрение выполнено без привлечения бюджетных средств. В Украине добыто более 10 млн м³ метана, произведено и поставлено в сеть на непрерывной основе 35 млн кВт·ч электроэнергии. При этом реальное сокращение выбросов парниковых газов составило более 160 тыс. т в эквиваленте углекислоты. Внедрение разработанных технологий на крупных полигонах Украины позволит ежегодно стабильно замещать 0,5 млрд м³ природного газа. *Библ. 10, рис. 9, табл. 1.*

Ключевые слова: альтернативная энергетика, полигон твердых бытовых отходов, свалочный биогаз, генерация электроэнергии, извлечение и хранение диоксида углерода, гидрат метана.

Институт газа НАН Украины является ведущим научным учреждением в Украине по разработке технологий переработки и утилизации свалочного газа. На основе проведенного системного анализа полигонов твердых бытовых отходов (ТБО) крупных городов разработаны научные основы и методология создания систем утилизации биогаза в энергетических установках, разработаны комплексные технологии сбора, подготовки и использования биогаза с выработкой тепла, биометана (аналога при-

родного газа) и углекислоты, их хранения и поставки потребителям безтрубопроводным транспортом в виде гидратов.

Усредненные результаты химического анализа свидетельствуют о высоком содержании метана (более 50 %) в биогазе, что соответствует низшей теплотворной способности 20–25 МДж/нм³. Высокий топливный потенциал биогаза полигонов ТБО позволяет эффективно его использовать вместо природного газа в энергетических установках, на транс-

портных средствах и для подачи в газовые сети Украины.

Обращение с ТБО, в том числе с их производными (свалочным газом и фильтратом), приобретает стратегическое значение. Полигоны ТБО в Украине не имеют краткосрочной альтернативы для утилизации бытовых отходов, поступающих ежегодно в количестве 12–13 млн т. Полигоны расположены по всей территории страны вблизи населенных пунктов и работают как реакторы, выделяя в атмосферу метаносодержащий горючий газ в объеме до 1 млрд м³/год.

В настоящее время захоронение на полигонах и свалках является основным способом обезвреживания ТБО во всем мире. Их количество ежегодно увеличивается на 3–6 %. В разных странах на одного жителя в год обычно приходится от 250 до 700 кг ТБО, а в некоторых странах до 1000 кг. В Украине насчитывается около 4,5 тыс. полигонов ТБО общей площадью более 7,5 тыс. га [1].

При захоронении органического вещества, которого в мусорной массе содержится в среднем от 50 до 70 %, происходит его биоконверсия с участием микроорганизмов. В результате этого процесса образуется биогаз, макрокомпонентами которого являются метан и диоксид углерода. Каждая 1 т бытовых отходов выделяет 120–200 м³ биогаза [2]. Из 11–13 млн т ТБО, ежегодно вывозимых на полигоны Украины, в процессе анаэробной переработки всей органической массы выделяется примерно 800 тыс. т СН₄. Поскольку метан имеет в 21–25 раз больший парниковый эффект, чем углекислый газ, это количество эквивалентно 16 млн т углекислоты, что вызывает негативные эффекты локального и глобального характера.

В большинстве развитых стран (США, страны Западной Европы) активно ведется сбор биогаза из мест захоронения ТБО. В частности, в мире проводятся мероприятия в рамках программы Глобальной Метановой Инициативы (Global Methane Initiative, GMI) Агентства по Защите Окружающей Среды США (EPA) [3]. Утилизация свалочного газа позволяет не только улучшить экологическую ситуацию, но и производить электроэнергию и тепло, частично заменяя полезные ископаемые. Наилучшие с точки зрения EPA технологии сбора и энергетической утилизации свалочного газа изложены в сборнике International Best Practices Guide for LFGE Projects – 2012.

Кроме существенного вклада в глобальное потепление, свалочный газ способствует появлению взрыво- и пожароопасных условий на самих свалках и на близлежащих объектах. Не-

контролируемое горение свалок приводит к образованию и попаданию в атмосферу токсичных соединений, в том числе особо токсичных веществ – диоксинов и фуранов, которые переносятся на значительные расстояния.

Сбор биогаза с полигонов ТБО с полезной утилизацией для производства энергии является обязательным требованием современного обращения с отходами. Это, в частности, утверждено в Украине приказом Министерства жилищно-коммунального хозяйства № 435 от 01.12.2010 «Об утверждении Правил эксплуатации полигонов бытовых отходов»: «... полигон бытовых отходов должен быть оснащен системами защиты грунтовых вод, обезвреживания биогаза и фильтрата...». Требования по сбору и утилизации биогаза, выделяемого полигонами ТБО, были введены с принятием строительного стандарта ДБН В.2.4-2-2005 «Полигоны твердых бытовых отходов. Основные положения проектирования».

Обследование полигонов ТБО Украины. Потенциал свалочного газа. В последнее время проекты сбора и утилизации биогаза активно развиваются в Украине. Проведено обследование некоторых полигонов ТБО: определены состав свалочных газов, производительность скважин, установлен потенциал добычи свалочного биогаза. Принят закон Украины № 5485-VI от 20.11.2012 «О внесении изменений в Закон Украины “Об электроэнергетике” относительно стимулирования производства электроэнергии из альтернативных источников энергии», устанавливающий «зеленый тариф» на электроэнергию, полученную в результате утилизации свалочного газа.

Для распространения технологий добычи и использования свалочного газа в Украине первым шагом должно быть выполнение нескольких демонстрационных проектов, цель которых показать техническую возможность, экономическую и экологическую целесообразность использования таких технологий.

С целью определения эмиссии биогаза отечественных складированных отходов сотрудниками Института газа НАН Украины были проведены обследования полигонов Украины различной степени освоения и сроков эксплуатации в Киеве, Одессе, Сумах, Харькове, Ивано-Франковске, Львове, Николаеве и др. Они проводились на действующих и закрытых площадках (картах), открытых и рекультивированных (засыпанных грунтом) участках сроком с начала складирования ТБО до 50 лет [4]. К сожалению, далеко не все полигоны ТБО Украины отвечают минимальным требованиям по их



Рис.1. Мобильная аппаратура для исследования скважин биогаза.



Рис.2. Горение биогаза.

обустройству и рекультивации выведенных из эксплуатации участков (карт). Уникальностью разработанных авторами технологий является их применимость, в том числе к таким полигонам (свалкам).

Отбор биогаза из скважин производили с помощью мобильной аппаратуры оригинальной конструкции, состоящей из генератора электроэнергии мощностью 2 кВт и вакуум-компрессорного блока отбора биогаза, создающего разрежение до 2 кПа и измеряющего поток газа, поступающего на факел (рис.1, 2). Исследования показали, что для некоторых полигонов производство биогаза составит 350–2400 м³/ч (приблизительно 190–1200 м³/ч метана). Данные величины, несомненно, представляют интерес для добычи газа на коммерческой основе.

Усредненные результаты химического анализа биогаза приведены в таблице. Эти данные свидетельствуют о достаточно высо-

Содержание газов в биогазе обследованных полигонов ТБО Украины

Полигон ТБО	CH ₄ , % (об.)	CO ₂ , % (об.)	O ₂ , % (об.)	N ₂ , % (об.)	H ₂ S, % (об.)	H ₂ O, % (об.)
№ 1	64,11	32,20	–	1,59	0,07	2,03
№ 2	61,25	29,95	1,38	6,04	–	1,38
№ 3	54,03	39,53	–	4,93	–	1,51
№ 4	67,11	20,46	4,11	6,18	–	2,14
№ 5	70,65	23,34	–	3,45	–	2,56

ком содержании метана (более 50 %) в биогазе, что соответствует теплотворной способности 20–25 МДж/м³. Содержание углекислого газа составляет 20–40 % (об.).

На основании результатов исследований для каждого из полигонов специалистами Института газа НАН Украины и производственной компании ООО «ЛНК» были проведены расчеты эмиссии биогаза и предполагаемой мощности электростанций с использованием методики, учитывающей типовой морфологический состав ТБО с разделением его на 4 группы отходов, имеющих разную скорость биологического разложения. Программа расчета разработана компанией «SCS Engineers» (США) на основании многолетних исследований по заданию Агентства по Защите Окружающей Среды США.

Для Киевского полигона ТБО № 5 использовали следующие базовые исходные данные для расчета: начало завоза ТБО – 1986 г.; завезено ТБО в 2012 г. – 330 тыс. т; накопленное количество ТБО (на 2012 г.) – 6100 тыс.т; средняя глубина полигона – 16 м; ожидаемый срок закрытия и рекультивации полигона – 2020 г. Результаты расчетов представлены на рис.3.

На основании расчетов, в основу которых были положены приведенные данные Киевского полигона ТБО № 5, определена мощность генерирующего оборудования (которое будет использовать в качестве топлива для двигателей-генераторов биогаз дегазации полигона

ТБО), а также количество утилизируемого биогаза. Показано, что на данном полигоне ТБО можно гарантированно реализовать проект по строительству первой очереди биогазовой электростанции с начальной суммарной установленной мощностью 885 кВт и второй очереди – до 2000 кВт. Постепенно можно довести установленную мощность до 4600 кВт. Модульное исполнение генераторных блоков позволяет наращивать произве-

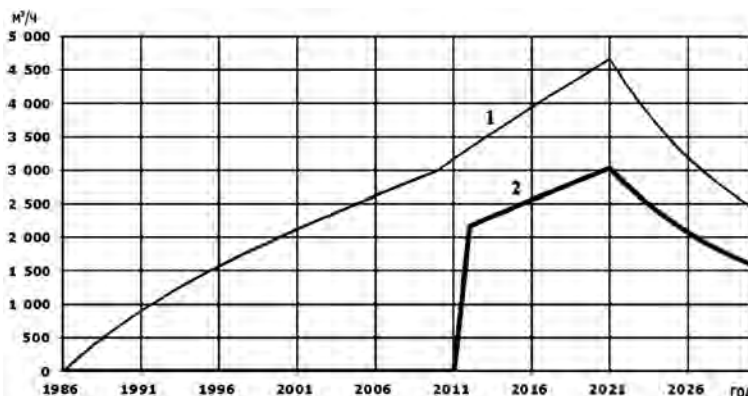


Рис.3. Общая эмиссия (1) и сбор биогаза (2) Киевского полигона ТБО № 5.

денную мощность пропорционально количеству и мощности одиночных блоков. В дальнейшем по мере истощения потока биогаза часть модулей можно демонтировать и установить на других полигонах ТБО.

Высокий топливный потенциал биогаза полигонов ТБО позволяет эффективно использовать его вместо природного газа в энергетических установках. Богатый опыт Института газа НАН Украины в области использования горючих газов позволил разработать технологические процессы применения биогаза.

Фракционирование свалочного газа.

Для очистки биогаза от диоксида углерода наибольшее распространение получили абсорбционные процессы с использованием физических, химических абсорбентов и их комбинации. В последние 10–15 лет находит применение эффективный абсорбент на основе метилдиэтанолamina (МДЭА) [5].

Были проанализированы варианты состава сорбента на основе МДЭА с активирующей добавкой моноэтаноламина (МЭА) применительно к биогазу. По результатам расчетов для этих вариантов принят оптимальный состав сорбента: 40 % МДЭА + (8–10) % МЭА.

На рис.4 представлена технологическая схема очистки биогаза водными растворами аминов, получения биометана и газообразного диоксида углерода, который сбрасывают в атмосферу ли-

бо направляют потребителю или на захоронение в геологических структурах и море.

Дальнейшее использование диоксида углерода как товарного продукта предполагает его сжижение для заправки в баллоны. Схема сжижения CO_2 с возвратом газовой фазы из изотермической емкости и подачи ее в компрессор приведена на рис.5.

Утилизация углекислоты. В настоящее время углекислота широко используется во многих отраслях промышленности и агропромышленного комплекса: в пищевой промышленности; в производстве, хранении и переработке сельскохозяйственной продукции; в медицине; в химической и бумажной промышленности; в строительной промышленности; в добывающей промышленности – в газообразном состоянии (углекислый газ), а также в пищевой промышленности; в холодильной промышленности; в металлургии; в добывающей промышленности – в жидком состоянии (низкотемпературная углекислота).

По основным физико-химическим показателям газообразный и жидкий диоксид углерода делится на три основных вида с содержанием CO_2 не менее, % (об.): высший сорт – 99,9; 1-й сорт – 99,5; 2-й сорт – 98,8.

Жидкая углекислота поставляется в углекислотных баллонах под давлением, согласно ДСТУ ГОСТ 4817-07.

В настоящее время весь мир обеспокоен проблемой постоянного роста выделения углекислого газа в атмосферу, связанного с деятельностью человека. Необходимы разработки новых масштабных технологий по предотвращению выбросов в атмосферу CO_2 . Активно развивается технологическое направление улавливания и хранения диоксида углерода (Carbon Capture and Storage – CCS), преимущественно в геологических формациях. За прошедшие два года правительства Австралии, Канады, Японии, Норвегии, Республики Корея, Великобритании, США и Европейская Комиссия осуществляли значительное финансирование и активно способствовали разворачиванию больших проектов для демонстрации масштаба CCS. Правительства анонсировали обязательство запустить до 2020 г. от 19 до 43 масштабных проектов. Законодательство многих стран экономи-

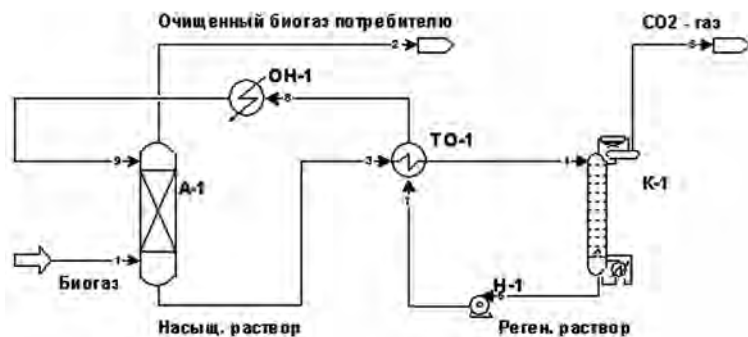


Рис.4. Принципиальная технологическая схема аминной очистки биогаза: А-1 – абсорбер; К-1 – десорбер; ТО-1 – рекуперативный теплообменник; ОН-1 – теплообменник (охладитель); Н-1 – насос.

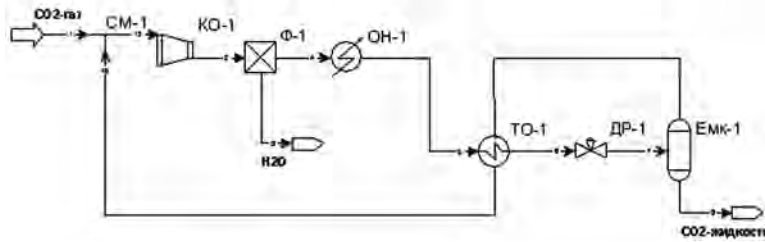


Рис.5. Технологическая схема сжижения CO_2 с возвратом газовой фазы из изотермической емкости: КО-1 – компрессор; Ф-1 – блок осушки; ОН-1 – теплообменник (охладитель); ТО-1 – рекуперативный теплообменник; ДР-1 – дроссель; Емк-1 – изотермическая емкость; СМ-1 – смеситель.

чески существенно стимулирует развертывание таких экологически чистых технологий, как ССС. В основном эти стимулы направлены на промышленный сектор [6].

Удаление диоксида углерода из продуктов сгорания естественных топлив достаточно разработано, создано множество промышленных технологий, в частности, химическая абсорбция, физическая абсорбция и адсорбция, криогенная сепарация, мембранная технология.

Технологии хранения CO_2 разработаны в меньшей степени, особенно для глобального приложения. Необходимо учитывать степень экологических рисков для условий подземного хранения углекислого газа, а именно: вероятность его проникновения на поверхность через пористые породы, разломы в земной коре и т.п., в том числе могущие возникнуть уже в процессе хранения в результате тектонических изменений. Наиболее перспективным методом геологического хранения углекислого газа, на наш взгляд, является его депонирование в придонный слой мирового океана в виде гидратов. На дне моря они сохраняют стабильность в течение десятков тысяч лет благодаря тому, что для высвобождения углекислого газа из гидратной структуры требуется энергия 62,3 кДж/моль [7].

Началом изучения газовых гидратов в Украине следует считать работы А.П.Клименко и Л.Ф.Смирнова [8]. Экспериментальные исследования гидратов проводились в Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики (гидраты фреонов) и Кировоградском национальном техническом университете (гидраты диоксида углерода). Гидраты метана (природного газа) на специальном оборудовании в Украине не исследовались.

С целью исследования процессов образования и диссоциации гидратов углеводородных соединений, входящих в состав природного газа, а также углекислого газа на базе гигрометра ТОРОС-3-2ВИЗ (собственной разработки) созданы стенд и экспресс-метод определения тер-

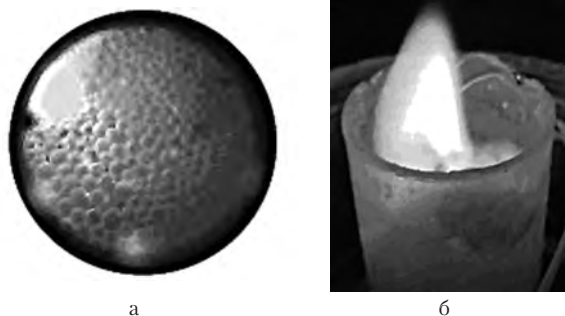


Рис.6. Гидраты метана, полученные на опытно-стенде (а), и горение гидратов метана (б).



Рис.7. Общий вид установки очистки биогаза.

модинамических и кинетических параметров преобразования гидратов.

В результате проведения экспериментов установлены термодинамические условия образования и диссоциации гидратов метана и углекислого газа, получены гидраты. Форма гидратов — скопления сфер диаметром 2–3 мм (рис.6).

Использование метана. На одном из полигонов в США (г. Билокси, Миссури) введен в эксплуатацию комплекс сбора биогаза. Для данного полигона по техническому заданию заказчика Институтом газа НАН Украины была разработана система очистки биогаза от диоксида углерода и других примесей для подачи его в магистральный газопровод [9].

Расход биогаза в среднем составляет 4250 $\text{м}^3/\text{ч}$. Состав биогаза, % (об.): CH_4 — 50; CO_2 — 40; N_2 — 8; O_2 — 2. С учетом подачи метана в газопровод высокого давления в качестве абсорбента используется физический растворитель — пропиленкарбонат. Проведен монтаж установки на указанном полигоне. Общий вид установки представлен на рис.7.

Утилизация свалочного биогаза с выработыванием электроэнергии. В Институте газа НАН Украины разработана собственная система сбора и утилизации свалочного газа с применением современных методов расчета, технических решений и материалов. Система сбора и первичной подготовки свалочного газа к использованию в двигателях внутреннего сгорания с генерацией электроэнергии состоит из скважин, шлейфовых трубопроводов, коллекторов шлейфов, магистральных трубопроводов, сепараторов влаги.

Математическое моделирование было произведено с использованием программной системы (ПС) ГазКондНефть, разработанной в Институте газа НАН Украины [10].

В результате расчетов получены основные характеристики системы: материальный баланс биогаза в системе, разности давлений (вход-выход) на всех участках трубопроводов, скорости



Рис.8. Станция переработки свалочного биогаза в электроэнергию (полигон ТБО № 5).



Рис.9. Бориспольская станция переработки свалочного биогаза в электроэнергию мощностью 1 МВт.

потока газа, фазовый состав потока. Система проанализирована на отсутствие выхода за допустимые пределы указанных параметров.

Производительность системы — 800 м³/ч, общая длина шлейфовых трубопроводов — 6997 м, магистрального трубопровода — 258 м.

Разработанная модель комплексной системы добычи и коллектирования биогаза, адаптированная для показателей полигона ТБО № 5 г. Киева, позволяет оперативно производить необходимые расчеты при изменении проектных параметров.

Внедрение технологий утилизации свалочного биогаза на полигонах ТБО Украины. Технологические разработки были успешно внедрены на полигонах ТБО № 5 (Киев) и Бориспольском (Киевская обл.).

На полигоне ТБО № 5 создана станция по переработке свалочного газа в электроэнергию. Станция мощностью 925 кВт (рис.8) включает систему сбора и подготовки биогаза, описанную выше, блок из 5 газопоршневых генераторов TEDOM Cento 180 (Чехия) и трансформаторную подстанцию. Производимую электроэнергию передают в централизованную сеть на постоянной основе. Станция является первой очередью комплекса, рассчитанного на производство 4,5 МВт электроэнергии. В 2013 г. к оборудованию был добавлен газопоршневой генератор «Jenbacher» (Дженерал Электрик, США, Австрия) мощностью 1 МВт. Первая очередь эксплуатируется в бесперебойном режиме 3 года. Эксплуатация станции позволила снизить выбросы парникового метана ежегодно на 60,0 т CO₂^{ЭКВ}.

На Бориспольском полигоне ТБО в 2013 г. внедрена система сбора и утилизации свалочного газа с использованием газопоршневого генератора «Jenbacher» (Дженерал Электрик) мощностью 1 МВт (рис.9).

По двум объектам (полигон ТБО № 5 и Бориспольский) выработано 26 млн кВт·ч электроэнергии, что позволило сэкономить 7 млн м³ природного газа и поставить в сеть электроэнергию на 40 млн грн. При этом реальное сокращение парниковых газов составило 75 тыс. т CO₂^{ЭКВ}.

Выводы

Определен потенциал свалочного газа в Украине. Разработан комплекс технологий, позволяющий использовать свалочный биогаз для производства электроэнергии и тепла, товарных биометана и углекислоты, уменьшить воздействие парниковых газов на окружающую среду.

Список литературы

1. Бондаренко Б.И., Жовтянський В.А. Проблема утилізації твердих побутових відходів та знешкодження небезпечних відходів в Україні: Від проекту концепції — до державної науково-технічної програми // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2008. — № 4. — С. 63–69.
2. Пятничко А.И., Баннов В.Е. Утилизация биогаза закрытых полигонов ТБО // Экология плюс. — 2009. — № 4. — С. 12–14.
3. Global Methane Initiative. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.epa.gov/globalmethane/index.htm>
4. Пятничко А.И., Жук Г.В., Баннов В.Е. Результаты обследования полигонов ТБО Украины для установления объемов добычи и состава биогаза // Техн. газы. — 2010. — № 2. — С. 63–66.
5. Лавренченко Г.К., Копытин А.В., Пятничко А.И., Иванов Ю.В. Оптимизация состава абсорбентов амины — вода узла извлечения CO₂ из дымовых газов // Техн. газы. — 2011. — № 1. — С. 16–25.
6. Carbon Capture and Storage: Progress and Next Steps // Отчет IEA/CSLF для саммита группы G8, Muskoka. — 2010. — 44 с.
7. Бондаренко Б.И., Пятничко А.И., Жук Г.В. Гидратное хранение углекислого газа // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2011. — № 3. — С. 52–54.
8. Клименко А.П. Клатраты. — Киев: Наук. думка, 1989. — 73 с.
9. Крушневич Т.К., Пятничко А.И. Извлечение метана из биогаза полигонов и подача его в магистральный газопровод // Техн. газы. — 2006. — № 3. — С. 41–44.
10. Калашников О.В., Иванов Ю.В., Будняк С.В. Вопросы адекватности теплофизической базы программных систем HYSYS, PRO-2 и ГазКонд-Нефть. 2. Смеси углеводородов, воды, метанола и гликолей // Экологические и ресурсосбережение. — 2000. — № 1. — С. 31–35.

Поступила в редакцию 17.11.15

Жук Г.В., докт. техн. наук, **П'ятничко О.І.,** канд. техн. наук,
Кубенко С.Б., **Іванов Ю.В.,** **Крушневич С.П.,**
канд. техн. наук, **Федоренко Д.С.**

Інститут газу НАН України, Київ

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

Комплексна утилізація звалищного газу полігонів твердих побутових відходів України

Проведено системний аналіз полігонів твердих побутових відходів великих міст України. Розроблено наукові засади та методологію створення систем утилізації біогазу в енергетичних установках, а також комплексні технології збору, підготовки та використання біогазу з виробленням електроенергії, тепла, біометану (аналога природного газу) та вуглекислоти, їх зберігання та постачання споживачам у вигляді гідратів безтрубопровідним транспортом. Розроблено проекти та впроваджено на полігонах твердих побутових відходів промислові комплекси захисту атмосфери від парникових газів, їх утилізації з виробленням електроенергії загальною потужністю 5,2 МВт для централізованої електромережі. Впровадження виконано без залучення бюджетних коштів. В Україні видобуто більше 10 млн м³ метану, вироблено та поставлено в мережу на безперервній основі 35 млн кВт·год електроенергії. При цьому реальне скорочення викидів парникових газів склало понад 160 тис. т у еквіваленті вуглекислоти. Впровадження розроблених технологій на крупних полігонах України дасть змогу щороку стабільно заміщати 0,5 млрд м³ природного газу. *Бібл. 10, рис. 9, табл. 1.*

Ключові слова: альтернативна енергетика, полігон твердих побутових відходів, звалищний біогаз, генерація електроенергії, вилучення та збереження діоксиду вуглецю, гідрат метану.

Zhuk H.V., Doctor of Technical Sciences,
Pyatnichko A.I., Candidate of Technical Sciences, **Kubenko S.B.,**
Ivanov Yu.V., **Krushnevich S.P.,** Candidate of Technical Sciences,
Fedorenco D.S.

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

39, Degtyarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: hen_zhuk@ukr.net

Multipurpose Utilization of Landfill Gas in Ukraine

Handling solid waste (MSW), including their derivatives – landfill gas and leachate, today takes on strategic importance. Currently landfills in Ukraine do not have short-term alternatives for the disposal of waste received annually in an amount of 12–13 billion tons. Landfills are located throughout the country near cities and work as reactors emit into the atmosphere methane-inclusive combustible gas in the volume of 1 billion m³ per year. Gas Institute of NAS of Ukraine is the leading research institution in Ukraine developing processing and utilization technologies of landfill gas. Based on a systematic analysis of major cities landfills scientific principles and methodology of biogas generation and utilization in power plants were developed, a complex technology was developed of gathering, processing and use of biogas to power generation and biomethane fuel (similar to natural gas) producing, and carbon dioxide storage, and pipeless transport supplies to consumers in the form of hydrates. Averaged results of chemical analysis indicate a high content of methane (50 %) in the landfill gas, which corresponds to net calorific value of 20–25 MJ/Nm³. High fuel capacity of landfill biogas can effectively use it instead of natural gas in power plants and vehicles, for its gas supply network in Ukraine. Projects were developed and implemented at landfills of Ukraine, industrial complexes protect the atmosphere of greenhouse gases and make their utilization with power generation of 5,2 MW total for centralized power supply. Implementation was done without

the involvement of state funds. To date more than 10 billion cubic meters of methane and 35 billion kWh of electricity were produced and delivered to the network on a continuous basis. This real made reductions in greenhouse gas emissions amounted to 160 ths. tons equivalent of carbon dioxide. The implementation of the technologies developed for large landfills of Ukraine will steadily replace 0,5 billion m³ of natural gas in a year. *Bibl. 10, Fig. 9, Table 1.*

Key words: alternative energy, landfill biogas, gas-piston engines, power generation.

References

1. Bondarenko B.I., Zhovtianskii V.A. Problema utilizacii tverdikh pobutovikh vidkhodiv ta zneshkodzhennia nebezpechnik vidkhodiv v Ukraїni : Vid proektu kontseptcii – do derzhavnoi naukovo-tekhnichnoi programi, *Energotechnologii i resursoberezhennia [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2008, (4), pp. 63–69. (Ukr.)
2. Pyatnichko A.I., Bannov V.E. Utilizaciya biogaza zakrytyh poligonov TBO, *Ekologiya plyus*, 2009, (4), pp. 12–14. (Rus.)
3. Global Methane Initiative. – [Online Resource]. – Access mode: <http://www.epa.gov/globalmethane/index.htm>
4. Pyatnichko A.I., Zhuk G.V., Bannov V.E. Rezul'taty obsledovaniya poligonov TBO Ukrainy dlya ustanovleniya ob'emov dobychi i sostava biogaza, *Tekhnicheskie gazy*, 2010, (2), pp. 63–66. (Rus.)
5. Lavrenchenko G.K., Kopytin A.V., Pyatnichko A.I., Ivanov Yu.V. Optimizaciya sostava absorbentov aminy – voda uzla izvlecheniya SO₂ iz dymovykh gazov, *Tekhnicheskie gazy*, 2011, (1), pp. 16–25. (Rus.)
6. Carbon Capture and Storage : Progress and Next Steps, Otchet IEA/CSLF dlya sammita grupy G8, Muskoka, 2010, 44 s.
7. Bondarenko B.I., Pyatnichko A.I., Zhuk G.V. Gidratnoe hranenie uglekislogo gaza, *Energotechnologii i resursoberezhennia [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2011, (3), pp. 52–54. (Rus.)
8. Klymenko A.P. Klatraty, Kiev : Naukova dumrf, 1989, 73 p. (Rus.)
9. Krushnevich T.K., Pyatnichko A.I. Izvlechenie metana iz biogaza poligonov i podacha ego v magistral'nyj gazoprovod. *Tekhnicheskie gazy*, 2006, (3), pp. 41–44. (Rus.)
10. Kalashnikov O.V., Ivanov Yu.V., Budnyak S.V. Voprosy adekvatnosti teplofizicheskoy bazy programnykh sistem HYSYS, PRO-2 i GazKondNeft'. 2. Smesi uglevodorodov, vody, metanola i glikolej, *Ecotechnologii i resursoberezhennia [Ecotechnologies and Resource Saving]*, 2000, (1), pp. 31–35. (Rus.)

Received December 17, 2015

УДК 662.66

**Безценний І.В., Дунаєвська Н.І., канд. техн. наук,
Чернявський М.В., канд. техн. наук**

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ
вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: mchernyavski@yandex.com

Визначення кінетичних характеристик взаємодії коксів вугілля марок АШ, П та Г з киснем повітря та особливості горіння їх сумішей

Показано актуальність спалювання вугільних сумішей у пиловугільних котлоагрегатах ТЕС України, що спалюють антрацит. Досліджено взаємодію коксів антрациту, пісного та газового вугілля з киснем повітря. Визначено кінетичні константи швидкості горіння у наближенні Арреніуса для внутрішньокінетичного та внутрішньодифузійного режимів реагування для частинок розміром 90–200 мкм. Порівняно отримані результати з результатами інших авторів. Показано особливості взаємодії сумішей коксу антрациту з коксами пісного та газового вугілля з киснем повітря. Побудовано залежності швидкості реакції від ступеня конверсії при сталій температурі, а також від температури для коксів окремих марок та сумішей. Підтверджено припущення про незалежність вогорання компонентів суміші в ізотермічних умовах. *Бібл. 5, рис. 5, табл. 1.*

Ключові слова: вугільні суміші, кокс, швидкість горіння, антрацит.