

УДК 628.5

И.В. Цветкова, В.А. Лихоманенко, В.Л. Юшко, С.М. Русалин

ЛОКАЛЬНЫЙ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

ООО «ИнТех-Синтез», г. Тольятти, Россия

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепропетровск

Представлены результаты анализа ситуации с твердыми углеродсодержащими отходами и разработки локального энерготехнологического комплекса, включающего линию производства композиционного твердого топлива на основе сырья доступного на отдельной локальной территории регионов, газогенераторные установки, газодизельгенераторы заданной мощности.

Необратимое истощение нефтяных ресурсов в XXI веке, а также резкое увеличение стоимости жидких нефтяных топлив в последнее время, выдвинули необходимость использования альтернативных видов топлив для энергетических установок с двигателями внутреннего сгорания и ТЭЦ. В связи с отсутствием развитой инфраструктуры региональные энергетические предприятия ориентируются на применение дизельных энергоустановок (ДЭС) на базе двигателей внутреннего сгорания. В этой ситуации, региональные энергетические компании вынуждены отпускать электроэнергию потребителям по тарифам ниже себестоимости, покрывая убытки от реализации за счет субвенций из регионального бюджета.

Очевидно, что оптимальным решением проблем снабжения топливом действующих ДЭС, увеличения их мощностей, а также обеспечения топливом иных энергопроизводящих предприятий в дотационных регионах является разработка и внедрение технологий и оборудования, развитие производства на основе переработки местных топливно-энергетических ресурсов – низкопотенциальных и возобновляемых источников энергии (НВИЭ).

Термохимическая переработка и, в частности процесс газификации твердого топлива, хорошо изучен, имеется достаточно большой опыт его применения в производстве энергии, на транспорте и в химической технологии [1].

Переработка НВИЭ может осуществляться путем газификации с выработкой горючего генераторного газа, с последующим его исполь-

зованием в качестве топлива газодизельных агрегатов. Привлекательным обстоятельством газификации НВИЭ является то, что срок окупаемости энергоустановок этого типа составляет от 1 до 3 лет, что значительно меньше, чем у ветряных электростанций, малых ГЭС, солнечных и водородных электроэлементов, мини атомных электростанций, геотермальных ТЭЦ, а также мини – ТЭЦ с прямым сжиганием и с использованием парового цикла.

Технические приемы для осуществления оперативной модернизации стандартного энергетического оборудования и его перевода на альтернативное газообразное топливо, просты и не требуют высоких затрат. Техническое оборудование, методы и приемы газификации достаточно хорошо исследованы и не требуют обширных пояснений [2,3]. Производительность по газу, в зависимости от используемого топлива – 1,3–2,0 м³/кг. Суммарный энергетический потенциал процесса газификации твердых топлив составляет 75–85% от энергетического потенциала используемого твердого топлива [4].

Применению газогенераторной техники, в современных условиях, способствуют следующие обстоятельства, имеющие место, как на территории России, так и Украины: значительные запасы лесных ресурсов. В результате хозяйственной деятельности лесодобывающих и лесоперерабатывающих предприятий, образуются отходы – опил, щепа, сучья и обрезь деревьев. Таким образом, без какого-либо нанесения ущерба лесным плантациям можно ежегодно перерабатывать отходную древесину для нужд

© И.В. Цветкова, В.А. Лихоманенко, В.Л. Юшко, С.М. Русалин, 2014

энергетики, в количестве эквивалентном 37,5 млн. т.у.т. Масса производимой в России за год соломы злаковых и крупяных культур эквивалентна 51,9 млн. т.у.т. Её сбор не требует высоких затрат. В Украине, несмотря на частичное использование соломы в качестве топлива, тем не менее, ежегодно на полях Украины остаются неиспользованными 5 млн. т соломы. Общий энергетический потенциал соломы и отходов древесины составляет около 50% от энергии, вырабатываемой на ТЭЦ с использованием ископаемого топлива. В тоже время, такого рода топливо практически доступно только в районах его образования, так как транспортировка таких отходов экономически нецелесообразна. Децентрализованное использование этих отходов логично в регионах с высоким ресурсом растительной биомассы.

Практическое значение могут иметь все виды топлива, отвечающие следующим требованиям:

- доступность и распространенность для его массового использования;
- достаточная химическая активность топлива, которая обеспечивает возникновение его горения в кислороде воздуха;
- наличие достаточных тепловыделений на единицу массы сжигаемого вещества.

Твердые бытовые отходы в полной мере отвечают указанным требованиям. Элементный состав и энергетические характеристики ТБО и некоторых других видов топлив и НВИЭ представлены в табл. 1.

На территории РФ генерируется 130 млн. т/год твердых бытовых отходов с общим энергетическим потенциалом 26–30 млн. тонн условного топлива, что делает этот источник углеродсодержащего сырья очень привлекательным энергетическим ресурсом [5].

В Украине ежегодно накапливается более 10 млн т твердых бытовых отходов (ТБО), большая часть которых вывозится на свалки (90%). Пригодными для добычи и использования биогаза могут считаться лишь 160 из 800 санкционированных свалок, где и размещается около 30% всех ТБО Украины. Удельный выход газа составляет 120–400 куб м/т ТБО. Поэтому потенциал доступного для производства энергии биогаза на 90 крупнейших полигонах ТБО Украины составляет около 400 млн куб м в год, что эквивалентно 0,3 млн т у.т. Используемый потенциал свалок в Украине не значителен и не является значительным энергетическим ресурсом. Более эффективным методом выработки энергетических газов является газификация.

В результате проведенных сравнений морфологического состава ТБО, генерируемых в г.г. Москва, С.-Петербург и Тольятти, Ямало-Ненецком автономном округе и городах Украины нами установлено, что, несмотря на неоднородный состав бытовых отходов, элементный состав их горючей массы можно считать стабильным. По сути, ТБО являются мощным, постоянно возобновляемым энергетическим сырьем, по своим характеристикам близким к растительной биомассе, а в отдельных случаях превышающих энергетические показатели природных топлив.

Применение ТБО в качестве топлива практикуется во многих зарубежных странах, в первую очередь путем сжигания отходов в специальных печах, и составляет в их энергопроизводстве весомую долю. В России и в Украине использование ТБО в энергетических целях не превышает 2% [6].

Такие показатели ТБО, как высокие влажность, зольность, насыпной вес являются факторами, сдерживающими широкое энергетическое

Таблица 1

Элементный состав и энергетический потенциал НВИЭ

Наименование	Массовый состав, %							Q ^p /Q ^t , МДж/кг
	C ^p /C ^t	H ^p /H ^t	O ^p /O ^t	N ^p /N ^t	S ^p /S ^t	A ^p /–	W ^p /–	
Подмосковный бурый уголь	27,4/66,0	2,16/5,20	8,63/23,13	0,46/1,10	2,85/4,40	26,5/–	32/–	9,88/25,74
Торф	24,7/56,5	2,6/6,0	15,2/34,8	1,1/2,5	0,1/0,2	6,3/–	50/–	8,11/21,44
Дрова	30,0/51,0	3,6/6,1	25,1/42,2	0,4/0,7	–/–	0,6/–	40/–	10,2/18,85
Солома	34,5/46	4,4/5,9	30/40	0,4/0,5	0,09/0,12	5/–	20/–	13,5/17,4
ТБО – Москва	21,30/51,32	2,90/6,99	16,90/40,80	0,90/2,17	0,20/0,48	22/–	36/–	7,51/20,12
ТБО – Санкт-Петербург	17,52/50,48	2,31/6,63	14,33/41,28	0,47/1,35	0,09/0,26	31/–	34/–	5,90/19,11
Осадки сточных вод г.о. Тольятти	15,6/61,3	1,73/6,8	5,90/23,2	1,80/7,0	0,43/1,7	3,5/–	71/–	4,38/17,17
ТБО – ЯНАО*	22,03/55,08	3,04/7,61	13,66/34,15	1,05/2,62	0,22/0,54	15/–	45/–	9,38/ 26,03
ТБО – Мариуполь	21,01/52,85	2,85/7,16	14,69/36,96	0,98/2,46	0,22/0,56	23,8/–	36,45/–	7,58/21,29
ТБО-Днепропетровск промышленный район	20,87/52,73	2,82/7,12	14,95/37,74	0,79/1,99	0,17/0,42	22,85/–	37,55/–	7,39/21,18
ТБО Днепропетровск с/х район	22,8/52,45	3,03/6,97	16,62/38,24	0,86/1,97	0,16/0,36	16,07/–	40,46/–	7,81/21,16

Примечание: * – ЯНАО – Ямало-Ненецкий национальный округ.

кое использование этого привлекательного ресурса. Задача повышения и стабилизации теплотворной способности ТБО может решаться путем его обогащения % увеличения доли горючей массы за счет снижения в топливе содержания влаги и золы.

Обогащение может осуществляться, например, путем механического сепарирования ТБО с удалением максимального количества неорганических компонентов – керамики, стекла, металла и последующей подсушки оставшейся массы до требуемого уровня. Такие методы являются наиболее распространенными для получения продукта с заранее заданными стабильными показателями влажности и зольности. В тоже время, операции сортировки и подсушки ТБО являются высокзатратными и малоэффективными.

Другим приемом обогащения является смешение несортированного ТБО с твердым природным топливом, обладающим низкими показателями влажности и зольности – солома, угольный отсев, сухая древесина, отходы нефтепереработки, отработанные моторные и промышленные масла и др.

Учитывая, что утилизация и переработка ТБО имеет высокую экологическую значимость, наравне с необходимостью создания энергоресурсосберегающих технологий, целесообразно использовать готовые технические решения, разработанные для современных промышленных производств.

Так, для получения средне калорийного композиционного твердого топлива (КТТ) пригоден метод брикетирования.

В качестве технологического оборудования, для производства КТТ, применимы агрегаты, разработанные для формирования брикетов из угольных отсевов и пыли. Принципиальная схема брикетирующей установки представлена на рис. 1.

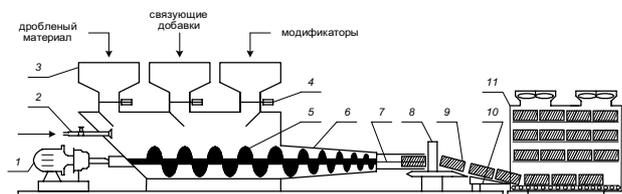


Рис. 1. Принципиальная схема брикетирующей установки:

- 1 – электродвигатель с редуктором; 2 – система подачи воды; 3 – бункер; 4 – дозатор; 5 – шнек;
- 6 – конусообразная рубашка; 7 – пустотообразователь;
- 8 – автомат для резки брикетов; 9 – цилиндрический брикет; 10 – вибораскладчик; 11 – сушилка

Перспективность производства брикетов КТТ основана на том, что для их приготовления возможно использование не только основных компонентов ТБО, но и приравненных к

ним высококалорийных источников углеродсодержащего сырья – отработанных моторных масел, отходов целлюлозно-бумажного производства, лигнина, иловых осадков сточных вод, торфа, древесных отходов, навоза, отходов птицеводства и прочих.

Практический опыт создания малотоннажных технологических линий для производства брикетов с применением ТБО в качестве основного топлива показал возможность производства КТТ со следующими показателями:

- содержание влаги – не более 10%;
- плотность – 1 кг/дм³;
- низшая теплотворная способность – 22–24 МДж/кг.

Производительность вновь создаваемых линий брикетирования может варьироваться от 1 до 10 тн/час, что позволит обеспечить функционирование энергоустановки мощностью 1–10 МВт. Простота, отсутствие жестких требований к гранулометрическому составу исходного сырья обеспечивает низкий удельный расход энергии на тонну готовой продукции по сравнению с другими видами технологического оборудования.

Результаты испытаний по газификации ТБО с различными композиционными составами в лабораториях АООТ НИИТП и НПО ЦНТИ им. И.И. Ползунова в котельных с топками колосникового типа позволили установить, что КТТ по энергетическим характеристикам соответствует длиннопламенным углям Печерского угольного бассейна и может применяться в качестве бытового, технологического и энергетического топлива.

С целью расширения доступной ресурсной базы НВИЭ нами исследована возможность использования влажных твердых продуктов, образующихся на различных этапах обработки городских сточных вод, в качестве сырья для выработки горючего газа.

Достаточно высокое содержание углерода в сухой массе таких отходов (табл. 2), позволяет прогнозировать высокий выход генераторного газа. Однако высокая влажность отдельных компонентов, в частности иловых осадков (до 97%), не позволяет реализовать процесс газогенерации без подвода внешнего тепла.

Путем смешения отдельных компонентов содержимого сточных вод, в нужной пропорции удается сформировать искусственные топливные композиции с небольшим содержанием углерода, но с достаточно низким содержанием влаги и золы (табл. 3)

Расчетные показатели процесса газификации композиционного твердого топлива позволяют предположить получение горючего газа с выходом, превышающим соответствующие характеристики древесного топлива, и теплотвор-

ной способностью близкой к соответствующим показателям газификации бурых углей (табл. 4).

Таблица 2

Элементный состав сухой массы отходов, %

Наименование компонента	Ил и шлам первичных отстойников	Отходы полимерловушек	Мусор грабельных решеток
Углерод, С	56,90	42,28	50,2
Водород, Н	6,26	4,86	6,8
Сера, S	1,86	0	1,1
Азот, N	6,66	0	13,2
Кислород, О	24,22	0	27,2
Зола, А ^с	4,10	52,86	1,5

Таблица 3

Состав смешанного отхода очистных сооружений

Наименование компонента	Смесь: ил: полимер-мусор грабельных решеток 40:3:1	Смесь в соотношении 13:3:1	Сухая масса
Углерод, С	15,6	38,6	54,0
Водород, Н	1,73	4,3	6,0
Сера, S	0,43	1,1	1,5
Азот, N	1,80	4,4	6,2
Кислород, О	5,90	4,5	20,3
Зола, А ^с	3,44	8,7	12,0
Влага W ^p	71,1	28,4	0

На основании опытно-промышленных испытаний, проведенных представителями ООО «ИнТех-Синтез» на базе Опытного Ремонтно-Механического завода (г. Тольятти), было предложено новое концептуальное решение. Суть его заключается в создании локального энерготехнологического комплекса (ЛЭК), включающего линию производства КТТ на основе сырья доступного на отдельной локальной территории региона, газогенераторные установки (ГГУ), а также газодизельгенераторы заданной мощности. В качестве опытного образца энерготехнологической установки нами была использована ГГУ конструкции ЦНИДИ и газодизельгенератор с базовым дизелем Д12(12 Ч15/18), модернизированным для работы с применением низко потенциального генераторного газа в качестве основного топлива. Номинальная мощность газодизельгенератора по выработке электроэнергии составляла 100 кВт·час.

Конструкция газогенератора первого поколения имеет ряд технических особенностей, способствующих улучшению и стабилизации параметров процесса газификации твердого топлива [8].

Выбор этой газогенераторной установки был обоснован следующими обстоятельствами:

- возможностью использования широкого фракционного состава твердого топлива (от древесных опилок и до крупногабаритных материалов);

- механизированной шлюзовой загрузкой твердого топлива без изменения заданного режима работы оборудования;

- возможностью регулирования мощности ГГУ от 20% до 100% при устойчивой калорийности вырабатываемого газа;

- модульно – контейнерным исполнением оборудования, пригодного для транспортировки любым видом транспорта, не требующего обустройства специальных фундаментов при монтаже;

Работы по совершенствованию конструкции газогенератора продолжаются. В настоящее время разработано газогенераторное оборудование второго поколения, где достигнуто замещение дизельного топлива на 90–95%, и проведены успешные испытания на различных смешанных композициях твердого топлива: утильная резина, ТБО, рисовая шелуха.

Принципиальная технологическая схема ЛЭК представлена на рис. 2. Энерготехнологическая установка выполняется в блочно – модульном исполнении, что обеспечивает возможность ее транспортировки обычными видами транспорта и упрощает ее размещение на месте эксплуатации.

Испытания энерготехнологической установки с использованием различных видов топлива показали преимущество брикетированного КТТ в части выхода и качественных показателей генераторного газа. Состав генераторного газа, выработанного с применением паровоздушного дутья, изменяется незначительно при использовании разных видов сырья.

Технические решения, реализуемые при создании ЛЭК, не требуют внесения существенных изменений в конструкцию энерго генерирующих агрегатов малой (100–1000 кВт) и средней мощности (2–10 МВт).

Таблица 4

Характеристика режима и продуктов газификации различных отходов и их смесей

Сырье процесса, соотношение (массовое)	V с.г., м ³ /кг	V в.г., м ³ /кг	Температура газа, °С	Qн, кДж/нм ³ влажного газа	Qн, кДж/нм ³ сухого газа
Ил и шлам (30% влаги)	2,56	2,83	750	4099	5045
Отходы полимерловушек	2,19	2,42	750	3918	4844
Мусор грабельных решеток	3,00	3,13	750	4932	5623
Ил и шлам, полимер, мусор грабельных решеток 13:3:1	2,60	2,85	750	4153	5066

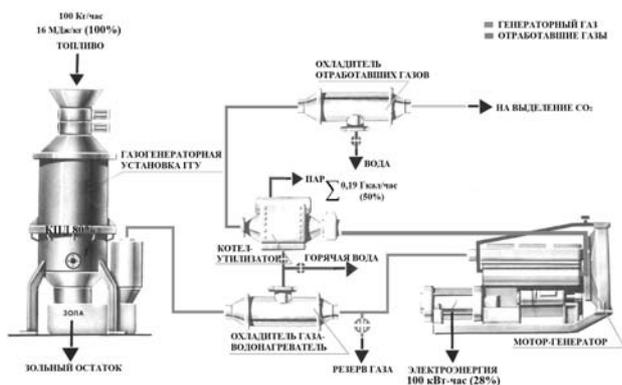


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема ЛЭК

Таблица 5

Средние показатели состава паровоздушного газа

Компоненты	Древесина	Торф	Бурый уголь	Топливный брикет (ИТТ)
CO	28,0	25,0	26,0	28,0
C ₂ H ₄	0,5	0,5	0,5	0,5
CH ₄	2,5	2,5	2,5	3,0
H ₂	13,0	13,0	15,0	15,0
CO ₂	7,0	7,0	6,0	4,5
Выход газа, м ³ /кг	1,25	1,4	2,1	3,3

Опыт исследования процессов газификации и создание газогенераторов для реализации указанных процессов подтвердил целесообразность применения для рассматриваемых диапазонов мощностей слоевой газификации с паровоздушным дутьем и обращенным процессом газогенерации. Этот фактор является существенным при выработке энергии.

Как правило, энергопроизводителями и потребителями энергии выдвигаются требования к бесперебойному функционированию энергоустановок, следовательно, к возможности в любой момент перейти на потребление традиционного топлива без остановки энергоагрегата. Требованиям многотопливности и адаптации к низкой теплотворной способности генераторного газа могут отвечать энергоустановки, оснащенные газодизельными двигателями с самонастраивающимися системами регулирования подачи газового топлива.

Модернизация дизельных двигателей для работы на топливе переменного состава осуществляется путем перехода на газодизельный цикл, при котором не требуется значительных изменений в конструкции базового двигателя, однако остается необходимость постоянного потребления некоторого количества дизельного топлива, но при этом сохраняется возможность работы по дизельному циклу [10].

Основной недостаток газогенераторных – газодизельных установок в составе электростан-

ций – это генерация значительного количества тепловой энергии (до 50% от общей выработки энергии), требующей постоянной нагрузки по потреблению тепла.

В качестве постоянного потребителя тепловой энергии возможно:

- применение цикла тригенерации в отопительный период (использование тепла горячей воды 90/70⁰C для выработки холода на абсорбционных машинах);

- производство пара, для обеспечения функционирования газотурбинной мини – ТЭЦ, что повышает выработку электроэнергии и снижает накладные расходы;

- использование тепла в тепличном хозяйстве.

В связи с тем, что в последние годы, остро стоит вопрос о защите окружающей среды от вредных выбросов, экологическим вопросам процесса термохимической переработки уделяется большое внимание. В частности, к вредным выбросам относятся оксиды азота, образование которых происходит в результате окисления свободным кислородом атмосферного азота и азота топлива. Образование оксидов азота из атмосферного азота является высокотемпературной реакцией, так как протекает через образование атомарного кислорода. Количество образующихся оксидов азота из азота топлива может происходить в широком диапазоне температур, в том числе и при сравнительно невысоких температурах и, в основном, определяется природой топлива и его составом.

При газификации топлива образование NO_x будет сопровождаться реакцией его разложения на твердой углеродной поверхности, которая может рассматриваться как вторичная реакция горения наряду с реакцией восстановления CO₂. Разложение NO_x при взаимодействии с углеродом может рассматриваться как метод очистки выбросных газов и продуктов сгорания от оксидов азота на углеродных фильтрах. По экспериментальным данным исследований трех реакций, в области температур 700–1100⁰C, реакция разложения оксидов азота на углеродной поверхности идет интенсивнее – более чем на два порядка, чем такая распространенная и широко изученная вторичная реакция, как газификация углерода его двуокисью. Этот метод, по-видимому, будет сложно использовать в «большой энергетике», но в малотоннажных технологиях, он может применяться для очистки генераторных газов [9]. Усложняющим обстоятельством термохимической переработки углеродсодержащего сырья является необходимость утилизации золы. Растительная биомасса и ТБО независимо от региона и времени формирования содержат постоянный набор микроэлементов – тяжелых металлов и их соединений. Сре-

ди тяжелых металлов обнаружены соединения меди, марганца, кадмия, ртути, кобальта, никеля, хрома, свинца, олова, цинка, молибдена, вольфрама, титана.

Большинство из них имеет высокую температуру плавления и кипения, поэтому в газобразное состояние при газификации не переходят. Такие металлы, как кадмий, ртуть, цинк при температуре до 1250°C переходят в парообразное состояние.

В зоне восстановления эти металлы, легко окисляются и конденсируются в золах процесса в виде оксидов. При остывании зольного остатка оксиды этих металлов, вместе с тяжелыми металлами топлива капсулируются специально вводимыми флюсами.

В активной зоне газогенератора температура достигает 1200–1300°C. При этой температуре неорганические продукты преобразуются в хрупкий шлак. Исследования шлаков, полученных при газификации различных видов топлив, показали что они состоят на 90–95% из силикатов, остальное слабо закристаллизованные вкрапления силлиманита, геленита, анортита, волластанита, тридимита и др. Шлаки газификации нерастворимы в воде и достаточно стойки в щелочах и слабых кислотах.

Таким образом, тяжелые металлы, содержащиеся в исходном топливе (ТБО, КТТ), при термохимической переработке – газификации выводятся в форме, не угрожающей окружающей среде, в виде соединений III и IV класса опасности, это делает возможным дальнейшее использование инертных шлаков при изготовлении строительных материалов.

На основании проведенных работ и анализа литературных данных можно сделать следующие выводы:

– альтернативу ископаемым энергоносителям могут составить такие возобновляемые источники углеродсодержащего сырья, как солома, отходы древесины, твердые бытовые отходы, торф, отработанные моторные масла, отходы целлюлозно-бумажного производства, лигнина, иловых осадков сточных вод, навоза, отходов птицеводства;

– в настоящее время накоплен достаточный опыт и имеются необходимые технические предпосылки для значительного сокращения доли привозного топлива в любом локальном регионе, заменяя его твердым местным топливом, прежде всего, растительной биомассой и твердыми бытовыми отходами при производстве энергии;

– применение топливных брикетов позволяет использовать смесевые композиции на основе топливного сырья и возобновляемых источников углеродсодержащего сырья с высоким энергопотенциалом, доступных на отдельной

локальной территории региона;

– использование энерготехнологической установки на основе газогенератора способно обеспечить электрической и тепловой энергией локальный регион, что способствует развитию его инфраструктуры;

– использование предлагаемых технических решений позволяет в значительной степени снизить антропогенное воздействие на окружающую среду путем утилизации отходов и сокращения площадей для их хранения, а также за счет снижения выбросов оксидов азота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канторович Б.В. Введение в теорию горения и газификации твердого топлива – М.: Металлургиздат, 1961. – 398 с.
2. Калечиц И.В. Химические вещества из угля. Пер. с нем. – М.: Химия, 1980. – 324 с.
3. Колеров Л.К. Газомоторные установки – М.: Машгиз, 1951. – 328 с.
4. Цветкова И.В., Лихоманенко В.А. Некоторые аспекты энерготехнологической переработки твердых бытовых отходов // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов: Сборник трудов ЕЛРПГ Т.2 II Международного экологического конгресса. – Тольятти, – 2009. – С.98.
5. Слюсарь Н.Н., Сангаладж Т.Н. Исследование состава отходов в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре. // Науч.-практич. журн. Твердые бытовые отходы. – 2012. – № 10. – С.12.
6. Пронина О.С. Технологические аспекты использования ТБО в теплоснабжении // Новости теплоснабжения. – 2008. – № 2. – С.29.
7. Никулин А.Н. Ресурсосберегающие технологии получения тепловой энергии на основе использования твердых горючих отходов углеродсодержащих материалов: Дис ...канд. техн. наук: 05.17.08. – С.-Петербург: ГИПХ, 2008. – 210 с.
8. Цветкова И.В., Лихоманенко В.А. Термохимическая переработка возобновляемых источников углеродсодержащего сырья – альтернатива ископаемых энергоносителям. / Экология и промышленность России. – 2012. – № 8. – С.19-21
9. Юшко В.Л., Русалин С.М. Разработка технологического и аппаратного оформления улавливания легких углеродородных газов и их последующего использования в энергетических целях / Технические и технологические газы. Энергоэффективное оборудование и установки для альтернативной энергетики: Труды Междунар. науч.-техн. конф.. – Сумы. – 2011. – С.4-8.
10. Режимно-технологические аспекты термохимической переработки вторичного сырья с целью его энергетического использования / В.А. Лихоманенко, И.В. Цветкова, В.Л. Юшко, С.М. Русалин // Вопр. химии и хим. технологии. – 2008. – № 6. – С.157-163.

Поступила в редакцию 3.02.2014