

Энергосберегающие технологии

УДК 662.65:662.763:621.387.14

Жовтянский В.А., чл.-корр. НАН Украины, докт. физ.-мат. наук,
Орлик В.Н., канд. техн. наук, **Петров С.В.**, докт. техн. наук,
Якимович М.В.

Институт газа НАН Украины, Киев

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

Общие принципы переработки отходов с извлечением их энергетического потенциала на основе плазменных технологий.

2. Газификация иловых осадков станций водоочистки

Работа посвящена развитию технологий переработки опасных углеродсодержащих отходов, в первую очередь, иловых осадков станций водоочистки, с применением плазменных источников энергии. Ставилась задача расширения перспектив их использования на основе возможности коммерциализации предлагаемых технологий. В соответствии с термодинамическим подходом, предложенным в первой части этой работы, выполнены оценки производительности и энергетической эффективности таких установок газификации в зависимости от мощности используемых плазмотронов. Показано, что в стехиометрическом с точки зрения производства синтез-газа режиме энергетические затраты на осуществление процесса газификации близки к уровню энергии от получаемого синтез-газа. Это создает хорошие предпосылки для высокой энергетической эффективности процесса переработки различных отходов близкого состава в условиях мобильных установок, так как практически исключается необходимость привлечения дополнительных источников энергии. В режиме дополнительного введения в процесс газификации кислорода затраты синтез-газа на собственные нужды установки составляют около 30 %. Оставшаяся его часть может использоваться для производства электрической энергии внешним потребителям, что будет способствовать коммерциализации разработки. Таким образом, в предложенном варианте технология переработки соответствует общей идее многочисленных публикаций в мировой литературе, известной как Waste to Energy. *Библ. 27, рис. 6, табл. 5.*

Ключевые слова: альтернативные газовые топлива, синтез-газ, плазменно-паровая газификация, плазмотрон, опасные отходы, иловые осадки станций водоочистки, витрификация.

1. Развитие технологий переработки опасных отходов с применением плазменно-паровой газификации

Ранее нами была представлена установка для переработки медицинских отходов производительностью 50 кг/ч [1]. Предварительный опыт ее эксплуатации доказал правильность предусмотренных в ней основных технических решений и работоспособность плазменного оборудования. Однако он выявил также определенные недостатки отдельных конструктивных решений, требующих пересмотра. В первую очередь это касается высокотемпературной теплоизоляции реакционного объема установки.

Развитие этой проблемы, как и переход на оборудование со значительно большей производительностью, нашли свое решение в рамках государственного заказа на выполнение подобной разработки со стороны Министерства образования и науки Украины [2]. В настоящее время работы проводятся на стадии создания более крупного реактора с усовершенствованной системой теплоизоляции. Фактическое состояние этого реактора в процессе монтажа представлено на рис.1.

В предлагаемом варианте для поддержания процесса переработки отходов будут сочетаться как энергия электродугового генератора плазмы, так и тепловая энергия, получаемая в результате частичного сжигания этого сырья в кислороде. При этом учтены результаты и подходы, предложенные в первой части этого цикла работ [3]. Включение в состав установки электродугового генератора пароводяной плазмы позволит получать продукты газификации максимального качества, обеспечивать витрификацию зольных остатков продуктов переработки, надежно контролировать процесс газификации независимо от качества сырья, а также максимально упростит начальный запуск установки. Предполагается, в частности, использование этого реактора для переработки донных илов станций очистки сточных вод. Вот почему в настоящей работе отдельно рассмотрены также особенности этого вида отходов и предварительные лабораторные результаты их газификации.

2. Водоиловая смесь и донные илы. Образование, состав и результаты исследований процессов их газификации

Ситуация вокруг накопления донных илов станций очистки сточных вод многих городов относится к числу кричащих «отложенных» экологических проблем Украины. Например, как уже акцентировалось в [3], по показателю



Рис.1. Корпус базового модуля реактора для плазменно-паровой переработки отходов производительностью не менее 200 кг/ч в стадии его монтажа.

донного ила только Бортнической станции аэрации г. Киева здесь накоплено ориентировочно 9 млн т этого сырья. Состояние ее сооружений давно уже создает значительную экологическую угрозу для окружающей среды. Традиционные методы переработки сточных канализационных вод приводят к образованию значительного количества твердых отходов, которые откладываются на иловых полях. Осадок и избыточный активный ил (особая смесь микроорганизмов и загрязняющих веществ, которые поступают в аэротенк очистных сооружений вместе со сточными водами), выпадающие из общего количества ежедневно поступающих на очистку канализационных стоков в объеме свыше 9 тыс. т, отправляют на иловые поля, суммарная площадь которых составляет 272 га. Они заполнены в 3 раза больше допустимой нормы; проблема их содержания решается постепенным наращиванием ограничивающих дамб. Высота последних в настоящее время составляет почти 10 м. Очевиден очень высокий риск для окружающей среды, включая загрязнение основной водной артерии Украины — реки Днепр, в случае прорыва этих дамб.

Всестороннее исследование химического состава и уровня загрязнения тяжелыми металлами и радионуклидами осадков сточных вод очистных сооружений Киева и других городов выполнено в работе [4]. К наиболее опасным их компонентам, в первую очередь, следует отнести тяжелые металлы. В сточных водах промышленных центров определяется до 20 металлов, при этом содержание свинца, хрома, мышьяка, кадмия и др. нередко превышает предельно допустимые концентрации. С начала складирования (в 1973 г.) илов Бортнической станции аэрации содержание цинка выросло в 2400 раз, хрома — в 3500, марганца — в 4000, свинца — в 7000.

Появились новые, ранее не обнаруженные, токсичные металлы в значительных количествах. Данные исследования подтверждают высокую загрязненность почв тяжелыми металлами.

Химический состав осадков сточных вод свидетельствует, что они имеют высокое содержание углерода. Сырые осадки сточных вод имеют следующий состав, % массы сухого вещества: С – 35,4–87,8; Н – 4,5–8,7; S – 0,2–2,7; N – 1,8–8,0; O – 7,6–35,4. Сухое вещество активного ила содержит, %: С – 44,0–75,8; Н – 5,0–8,2; S – 0,9–2,7; N – 3,3–9,8; O – 12,5–43,2. Осадки имеют слабокислую и нейтральную реакцию и заметное количество общего органического вещества, которое почти на 50 % состоит из гумусоподобных форм. Это дает основания считать целесообразной их газификацию плазменными методами, имея в виду, что тяжелые металлы будут витрифицированы в составе зольного остатка [3]. Эти осадки удобны для переработки, поскольку предусматривают возможность использования стационарных установок в технологически однородных условиях.

Предварительные исследования процесса газификации проведены на лабораторной установке с использованием пароводяного плазмотрона небольшой мощности «Мультиплаз-3500» [5].

В исходном состоянии водоиловая смесь имела вид жидкой суспензии темного цвета с влажностью на уровне 95 %, а донный ил по консистенции имел торфообразный вид. На рис.2 показаны фотографии водоиловой смеси после ее сепарации (она приняла вид густой суспензии) и донного ила после сушки (он сохранил торфообразный вид). В табл.1 показаны результаты их технического анализа.

Сводные данные по составу очищенных продуктов газификации представлены в табл.2.

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют, что в продуктах газификации этих отходов определяющей компонентой является синтез-газ – горячая смесь CO и H₂, существенно обогащенная последним. Наибольшим является содержание водорода в продуктах газификации донного ила (на уровне 70 % (об.)).



а



б

Рис.2. Внешний вид водоиловой смеси после ее сепарации (а) и донного ила после сушки (б).

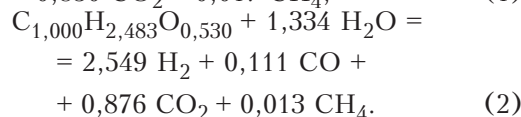
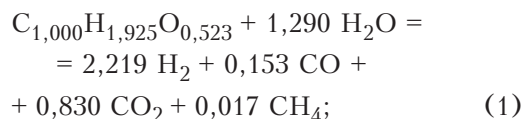
Таблица 1. Технический анализ илов

Твердое топливо	Влажность, % (мас.)	Летучие, % (мас.)	Зола, % (мас.)	Фиксированный углерод, % (мас.)
Топливо после сепарации и сушки водоиловой смеси	9,5	65,4	15,2	9,9
Донный ил	9,5	38,0	43,8	8,7

Таблица 2. Состав очищенных продуктов газификации

Твердое топливо	Состав сухого газа, % (об.)			
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄
Водоиловая смесь	68,9	4,8	25,8	0,5
Донный ил	71,8	3,1	24,7	0,4

С учетом данных табл.1, 2 были определены формулы реагирования в пересчете на углерод, водород и кислород органической массы водоиловой смеси и донного ила соответственно:

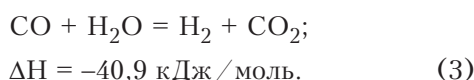


В целом представленные брутто-формулы отходов вполне коррелируют с представленными выше результатами работы [4] по химическому составу осадков сточных вод. Несколько неожиданно большой выглядит зольность донного ила (см. табл.1), однако она может характеризовать лишь случайную пробу донного ила, с которой работали авторы. Во всяком случае, даже такое высокое содержание золы (здесь преимущественно песка) не может быть определяющим по важнейшим для этой работы энергетическим характеристикам исследуемого углеродсодержащего сырья [6].

Однако анализируя результаты эксперимента [5], следует отметить его основной недостаток, связанный с общей низкой эффективностью процесса газификации, несмотря даже на относительно высокий выход водорода. Действительно, преобладающая часть углерода в процессах (1) и (2) направляется на производство балластного газа CO₂, а не горючего CO. Таким образом, этот экс-

перимент не может рассматриваться как слишком удачный с точки зрения достижения конечной цели процесса — высокой энергетической эффективности [7].

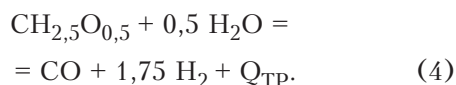
Основной причиной такого результата стала низкая температура стенки реактора — кварцевой трубки, которая составляла в этих исследованиях 430–480 °С. Поэтому формулы реагирования (1) и (2) описывают фактически суммарный результат двух процессов: собственно пароплазменной газификации сырья на оси трубки, где температура, определяемая струей плазмотрона, довольно высока, и так называемой реакции водяного сдвига у стенок трубки [3]:



Для последней оптимальной как раз является температура на уровне 500 °С [6].

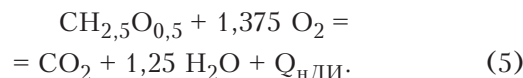
Не менее важным и негативным фактором стала низкая скорость реагирования углерода в такой системе, которая экспоненциально зависит от температуры. В результате значительная часть газифицирующего агента, водяного пара, проскакивает небольшой по размеру реактор, не реагируя с сырьем, что в целом предопределяет низкую энергетическую эффективность процесса.

Уже по внешнему виду брутто-формул для водоиловой смеси, особенно для донного ила, следует, что они должны иметь хорошие энергетические характеристики, исходя из соотношения в их содержании водородной и кислородной компонент [6]. В дальнейшем нами для принципиальных термодинамических оценок была выбрана простая и удобная для оценок брутто-формула донного ила в виде $\text{CH}_{2,5}\text{O}_{0,5}$, для которой выполнен анализ процесса плазменно-паровой газификации на основе более предпочтительной, чем (2), реакции [7] (далее она может использоваться в качестве базы для сравнений):



Здесь $Q_{\text{ТР}} = Q_{\text{R}} + \Delta Q$ — суммарная тепловая энергия, одна из составляющих Q_{R} которой выделяется в результате химических реакций в смеси заданного реакцией состава, а ΔQ вводится в реактор с помощью дополнительных источников энергии (здесь мы не обязательно ассоциируем их с плазмотроном) с таким расчетом, чтобы реагирующая смесь достигла необходимой температуры $T_{\text{Р}}$ получения продуктов газификации.

По стандартной методике [3] в соответствии с законом Гесса определялась энтальпия образования донного ила, которая предполагает знание теплоты его сгорания. Это следует из теоретического анализа реакции полного сжигания этого вещества:



Теплота сгорания $Q_{\text{нДИ}}$ на основе термодинамических соотношений является разностью суммы энтальпий образования продуктов реакции $\Delta H_{\text{Р}}$ и аналогичной суммы для исходных реагентов ΔH_{R} , что и позволяет в конечном итоге определить искомую энтальпию образования донного ила:

$$\Delta H_{\text{R}} = \Delta H_{\text{Р}} - Q_{\text{нДИ}}. \quad (6)$$

Так как энтальпия образования простых веществ ($\text{C}(с)$ — твердая фаза углерода, O_2 , N_2 и т.п.) принимается равной нулю, получим:

$$\Delta H_{\text{R}} = \Delta h_{\text{CH}_{2,5}\text{O}_{0,5}}; \quad (7)$$

$$\Delta H_{\text{Р}} = \Delta H^0_{\text{CO}_2} + 1,25 \Delta H^0_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (8)$$

где $\Delta H^0_{\text{CO}_2} = -393,5$ кДж/моль, $\Delta H^0_{\text{H}_2\text{O}} = -241,8$ кДж/моль.

Следовательно, $\Delta H_{\text{Р}} = -25,74$ МДж/кг.

Для оценки самой величины теплоты сжигания донного ила $Q_{\text{нДИ}}$ в (5) используется формула Менделеева [6]:

$$\begin{aligned} Q_{\text{нДИ}} &= -100 (81 c_{\text{C}} + 246 c_{\text{H}} - \\ &- 26 (c_{\text{O}} - c_{\text{S}}) - 6 c_{\text{W}}) \cdot 4,19 \text{ кДж/кг}, \end{aligned} \quad (9)$$

где c_{C} , c_{H} , c_{O} , c_{S} , c_{W} — массовые доли атомов углерода, водорода, кислорода, серы и воды.

Отсюда $Q_{\text{нДИ}} = -25,68$ МДж/кг.

Это дает возможность определить из (6) искомую энтальпию образования донного ила: $\Delta H^0_{\text{CH}_{2,5}\text{O}_{0,5}} = -76,8$ кДж/кг.

Термодинамический анализ процесса конверсии донного ила, выполненный в среде «ТЕРРА» [8], позволил определить состав основных продуктов его паро-плазменной газификации в зависимости от температуры в процессе протекания реакции газификации (4); при 1250 К он практически полностью определяется ее правой частью. Полученные выше данные позволяют по аналогии с анализом уравнения (6) определить энергию $\Delta Q(T)$, которую необходимо ввести на 1 кг массы реагентов в реакции (4), чтобы достичь их равновесного состояния при рабочей температуре в реакторе газификации.

фикатора. Различие заключается в том, что в отношении продуктов реакции рассматривается сумма полных энтальпий СО и Н₂. Они, кроме собственно энтальпий образования веществ, включают также зависящие от температуры составляющие, определяемые их теплоемкостью (см. формулу (6) в [3]); при 1250 К их значения составляют 38,8 и 36,8 кДж/моль для СО и Н₂ соответственно (привлекаются согласно справочным данным; представлены также в среде «ТЕРРА»). С учетом приведенных выше значений $\Delta H^0_{\text{CH}_2,500,5}$ и $\Delta H^0_{\text{H}_2\text{O}}$ результирующая энергия при $T = 1250$ К составляет $\Delta Q = 0,785$ кВт·ч/кг. Этот показатель позволяет определить производительность газификатора при заданной мощности плазмотрона. Указанное значение ΔQ почти в 2 раза меньше полученного в работе [3], что стало результатом различий в определении энтальпии донного ила. Это предопределяет дополнительное повышение оценочных показателей энергетической эффективности процесса по сравнению с цитируемой работой.

Пренебрегаем пока технологическими потерями и считаем, что процесс газификации по реакции (4) обеспечивает 100 %-й выход синтез-газа из начальной массы донного ила.

Учитывая, что теплотворность составляет для оксида углерода $Q_{\text{HCO}} = 283$ МДж/моль = 78,6 кВт·ч/моль = 2,8 кВт·ч/кг и для водорода $Q_{\text{H}_2} = 241,7$ МДж/моль = 67,2 кВт·ч/моль = 33,6 кВт·ч/кг [6], то она для синтез-газа в процессе (4) на 1 кг смеси составит:

$$Q_{\text{HCG}} = (1 \cdot 78,6 + 1,75 \cdot 67,2) / (1 \cdot 28 + 1,75 \cdot 2) = 196,2 / 31,5 = 6,23 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}.$$

Она позволяет определить энергетическую производительность установки газификации и ее энергетическую эффективность на основе сравнения с удельной энергией ΔQ , вводимой в реактор.

Подытоживая результаты выполненных в этом разделе количественных оценок энергетической эффективности пароплазменной конверсии иловых осадков сточных вод, можно заключить, что технологии на их основе могут функционировать в режиме, близком к энергетическому самообеспечению. Действительно, теплотворность синтез-газа в таком процессе приближается к 6,23 кВт·ч/кг. Эта величина существенно превышает затраты электроэнергии на производство 1 кг синтез-газа (в идеальном процессе их обеспечивает пароводяной плазмотрон), которые составляют 0,785 кВт·ч/кг. Таким образом, даже с учетом относительно низкого коэффициента использования топлива около 30 % в процессах генерации электроэнергии энергетические затраты близки к уровню

получаемой энергии синтез-газа, что создает хорошие предпосылки для энергетического самообеспечения процесса переработки иловых осадков сточных вод.

Как показывают результаты строгого термодинамического анализа, выполненного в первой части работы [3], существенное повышение эффективности конверсии может быть достигнуто при избыточном введении в число реагентов кислорода (по аналогии с процессами горения такой режим газификации назван нестехиометрическим, имея в виду неполноту газификации горючего в этом случае). Ниже, следуя цитируемой работе, рассмотрим влияние дополнительного кислорода на процесс газификации донного ила. Как и ранее, рассмотрим более детально варианты не- и стехиометрического режимов газификации.

3. О применимости приближения равновесного состояния

3.1. Модели равновесного состояния.

Принцип детального равновесия. Для полного описания равновесных газа или плазмы достаточно всего двух термодинамических параметров, например, температуры и давления. Необходимым и достаточным условием достижения полного термодинамического равновесия является выполнение детального равновесия [9]. Принцип детального равновесия означает, что каждый атомный процесс идет с такой же скоростью, что и обратный ему процесс. С учетом присущих высокотемпературному газу или плазме потерь энергии на излучение полностью равновесными могут быть лишь однородные и стационарные газовые или плазменные объекты бесконечных размеров. В них поведение общего ансамбля частиц и излучения в полной мере описывается единой температурой, причем спектральная интенсивность равновесного поля излучения определяется формулой Планка (излучение черного тела).

Важнейшим фактором нарушения термодинамического равновесия являются также процессы переноса частиц, в частности, диффузия, нарушающие принцип детального равновесия за счет, например, увода части реагирующих частиц в том или ином атомном процессе в элементарном объеме реактора на стенки, ограничивающие его объем, или в гетерогенных процессах на поверхность кускового газифицируемого материала.

В достаточно плотных излучающем газе или плазме, когда столкновительные процессы заселения возбужденных уровней атомов и мо-

лекул играют преобладающую роль, их результирующее состояние можно описать теми же закономерностями, что и в истинном термодинамическом равновесии, исключая излучение. Такое состояние вещества называют локальным термическим равновесием (ЛТР) [9]. При этом определение локальной излучательной способности атомов или молекул в отдельных спектральных линиях или в области континуума требует индивидуального расчета.

3.2. Отклонения от равновесного состояния плазмы. Применение ЛТР в плазме достаточно хорошо разработано. Специфика его применения состоит в необходимости определения специальных критериев, обосновывающих возможность применения этого приближения в тех или иных условиях существования плазмы [10–13]. Применительно к электродуговой плазме, являющейся основой функционирования используемых плазмотронов, в отечественной литературе приведены результаты детальных экспериментальных исследований особенностей отклонения от ЛТР в такой плазме [14].

3.3. Классические технологии газификации. Использование в газификаторах приближения равновесия довольно затруднительно вследствие разнообразия и неоднородности протекающих в них процессов. Еще основатель Института газа НАН Украины академик Доброхотов Н.Н. [15], а вслед за ним его ученики [16, 17] и последователи [18] подчеркивали это обстоятельство. Рассматривался газогенератор для прямого процесса газификации, представляющий собой вертикальную шахту из листового железа, обмурованную внутри огнеупорным кирпичом. Топливо в газогенератор подается сверху, а воздух, водяной пар или другие газообразные реагенты дутья — снизу под колосниковую решетку. Продукты газификации отводятся из верхней части газогенератора над слоем топлива. Шлак удаляется с колосниковой решетки в нижней части газогенератора.

В газогенераторе различают такие зоны [18]: золы и шлака, газификации, сухой перегонки и подсушки. Последние две объединяют под названием «зона подготовки». Слой золы и шлака (5–15 см) предохраняет колосниковую решетку от прогара и распределяет дутье по сечению газогенератора.

В зоне газификации интенсивно протекают реакции взаимодействия углерода с кислородом дутья, а также между продуктами реакций и разложения топлива. При достаточно высокой температуре слоя и равномерном обтекании кусков топлива производительность не лимитируется скоростью восстановительных реакций,

и высота зоны газификации не превышает 40–50 см для любых интенсивностей дутья. В зоне подготовки происходят подсушка и сухая перегонка и нагрев топлива.

Вследствие больших размеров кусков и значительной влажности древесины и торфа, а иногда и бурого угля, условия их газификации определяются подготовкой, характеризующей количество влаги и часть горючей массы, поступающих в зону газификации в зависимости от интенсивности работы, высоты слоя топлива и размера кусков топлива. При использовании мелкокусковых топлив с невысокой влажностью (антрацит, каменный уголь, кокс, иногда бурый уголь) можно считать, что в обычных условиях подготовка топлива является практически полной.

Подсушка и перегонка топлива, протекающие за счет тепла газов, выходящих из зоны газификации, — сложные процессы, связанные с прогревом топлива, выделением из него паро- и газообразных летучих и изменением размеров и свойств топлива, а также состава и количества нагреваемых газов.

Процесс подсушки происходит в две стадии: постоянной и падающей скоростей сушки. При газификации крупнокускового топлива происходит быстрая сушка газами с относительно высокой температурой, поэтому особенное значение имеет вторая стадия, на которой скорость внутренней диффузии влаги к поверхности тела лимитирует процесс сушки.

При небольших размерах кусков топлива, а также низкой температуре нагреваемых газов можно предположить, что куски топлива последовательно проходят стадии сушки, сухой перегонки и газификации. В поверхностных слоях крупных кусков топлива при значительном содержании влаги процессы сухой перегонки начинаются еще до того, как внутренние слои топлива окончательно подсохли, то есть в этом случае происходит совмещение зон подсушки и сухой перегонки.

Топливо, подвергающееся сухой перегонке, значительно уменьшается в размерах, растрескивается, и свойства его изменяются. Выделяющиеся из топлива газы примешиваются к газам, нагревающим топливом.

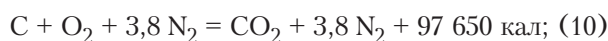
При достаточной длительности подсушки и сухой перегонки, а также достаточном теплосодержании газов, выходящих из зоны газификации, в последнюю поступает кокс, нагретый до температуры, близкой к температуре верхней границы зоны, и содержащий очень малые количества водорода и кислорода. При недостаточной подготовке топлива выделение влаги и летучих продолжается в зоне газификации.

Отсюда следует вывод о необходимости самостоятельного расчета процессов в зонах газификации и подготовки топлива и учета их взаимного влияния в зависимости от размеров газогенератора, интенсивности газификации и свойств топлива. Этот вопрос анализируется в книге [15]. Поскольку это издание давно уже стало раритетным, остановимся более обстоятельно на рассуждениях его автора — тогда еще молодого горного инженера. Анализируя значительный по объему материал эмпирических исследований газогенераторных процессов различных топлив, накопившийся в то время, он считает определяющим фактором для процессов газификации подразделение его именно на две части: нагрева топлива без доступа воздуха в верхней части шахтного газогенератора (сухая перегонка топлива) и на собственно процесс газификации, протекающий в нижней его части. Генераторный газ представляет собой смесь газов, получающихся от сухой перегонки топлива и по основному генераторному процессу.

Известно, что на стадии сухой перегонки топлива около 50 % кислорода переходит в воду, а еще 10 % — в углекислый газ. Кроме того, 45 % всего водорода переходит в метан, а еще 5 % — в этилен. Также в смолу переходит из топлива столько углерода, сколько в нем водорода; 80 % серы переходит в сероводород, а 20 % — в золу. Зная исходный состав газифицируемого топлива (в работе [16] это был каменный уголь), количество водорода и кислорода, которые пойдут на вышеупомянутые продукты разложения, легко определить количество оставшегося газообразного водорода и образующегося оксида углерода. Считается, что в золе остается 8 % углерода от его массы. Таким образом, по основному газогенераторному процессу сгорит 86,5 % всего углерода топлива.

В работе [15] рассматриваются три определяющие реакции для основного генераторного процесса:

— топочный в самом низу генератора



— разложения углекислого газа в следующем по высоте поясе генератора



— разложения паров воды раскаленным углеродом в том же поясе (реакция водяного газа)



Количество вводимого водяного пара на единицу топлива определяется, исходя из таких

соображений, чтобы не допустить плавления золы и, следовательно, исключить нарушение режима дутья через колосниковую решетку. Ввиду того, что зола используемого топлива очень тугоплавка, автор выбирает дополнительное введение к углю всего лишь 24 % водяного пара; при легкоплавкой золе это количество может быть увеличено до 35 %.

Скорость последней реакции меньшая, чем (11), то есть достигает своего равновесия в течение более длительного времени; обе они увеличиваются с повышением температуры, достигая практических значений при 900 °С (11) и 800 °С (12). Наоборот, при снижении температуры при выходе в свободное пространство обе реакции начинают идти в обратном направлении, снижая качество продуктов газификации и КПД установки; наибольшая скорость этого процесса имеет место при 700 °С, постепенно замедляясь при снижении температуры до 450 °С, при которой продукты закаляются.

В связи с последним обстоятельством Доброхотов Н.Н. уделяет особое внимание конструкции верха генераторов, чтобы минимизировать реакции разложения оксида углерода и превращения его и водорода в смолу и сажу, вследствие чего ухудшается качество газа и понижается КПД генератора. Для предотвращения этого нужно быстро понижать температуру газа с 700 до 500 °С. Целесообразно при газификации каменного угля, особенно кокса и антрацита, делать стенки генератора сверху не только не футерованными, но даже усиленно охлаждать их водою. Объем пустого пространства в каменноугольном генераторе должен быть возможно малым, чтобы уменьшить время пребывания газов в этом «вредном» пространстве.

По наблюдениям и аргументированным выводам автора, реакция водяного сдвига (3) в газогенераторах, вопреки распространенному мнению, отсутствует. Лишь при математическом анализе некоторых процессов целесообразно иногда вводить ее в рассмотрение вместо реакции (12).

Анализируя основной генераторный процесс, Доброхотов Н.Н. отмечает, что реакция (11) сначала внизу генератора идет в сторону образования продуктового газа, после прохождения максимума температуры в толще топлива, например, до 750 °С наступает на одно мгновение равновесие, а затем реакция идет в обратном направлении. То же самое происходит с реакцией (12), однако из-за того, что она более медленная, момент равновесия наступает, например, при 700 °С. Вследствие этого в гене-

раторе имеет место такая картина: температура в слое составляет, например, 1000 °С, но отношение $[\text{CO}][\text{CO}]/[\text{CO}_2]$ в газе соответствует, например, 700 °С, а отношение $[\text{CO}][\text{H}_2]/[\text{H}_2\text{O}]$ еще меньше (например, 625 °С). Отсюда делается вывод, что отношение этих дробных выражений $[\text{CO}][\text{H}_2\text{O}]/[\text{CO}_2][\text{H}_2]$ будет большим по значению, чем это следует при равновесном значении для 700 °С. Таким образом, ни в одной точке генератора ни на один момент не наступает полного химического равновесия.

Исходя из этих наблюдений, автором был сформулирован первый закон газогенераторного процесса, согласно которому отношение

$$r = [\text{CO}][\text{H}_2\text{O}]/[\text{CO}_2][\text{H}_2] \quad (13)$$

близко к постоянной величине в пределах $r = 1,7-2,5$. Он отражает собой результат борьбы за углерод между углекислым газом и водяным паром: чем больше углекислого газа и чем меньше водяного пара разложилось раскаленным углеродом, тем больше величина r ; чем меньше время пребывания топлива в генераторе (чем быстрее скорость генераторного процесса), тем большее значение имеет эта величина.

В целом решение задачи газогенераторного процесса сводится к рассмотрению системы 5 уравнений для 5 неизвестных в газе: CO , CO_2 , H_2 , H_2O и N_2 . Анализируя ее на основе соотношений баланса для количества частиц, применяя выражение (13) при эмпирически известном значении r (которое так или иначе изменяется в небольших пределах), и на основе теплового баланса эта система решена на примере дров и угля, а также рассмотрены особенности ее решения для других видов топлив.

Позже Доброхотов Н.Н. уделил значительное внимание исследованию диффузионных процессов в газогенераторах, являющихся одной из причин отклонения высокотемпературной среды от равновесного состояния [19, 20].

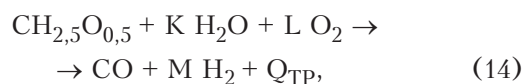
3.4. Установки для газификации с применением плазменных технологий. При рассмотрении условий применимости равновесных допущений к такого рода установкам следует учесть, что их главное предназначение — переработка вредных отходов. Наиболее распространенное требование к ним в этом случае определяется Директивой 2000/76/ЕС [21]. Она требует, чтобы при переработке опасных отходов с содержанием более 1 % (мас.) галогенсодержащих органических веществ в пересчете на хлориды температура поддерживалась на уровне 1100 °С, причем каждый локальный объем получаемых при переработке газов дол-

жен содержаться при этой температуре ≥ 2 с [3]. Если это требование перенести на конструкцию конкретного газификатора, то это соответствует радикальному изменению требования к верху газогенератора классической конструкции (см. предыдущий подраздел): здесь он должен быть достаточно больших размеров и настолько хорошо теплоизолированным, чтобы во всем его объеме поддерживалась указанная выше температура. Вопрос закалки получаемых продуктов газификации решается при этом одновременно с исключением образования диоксинов и фуранов на выходе генератора быстрым охлаждением продуктов газификации. Конструктивное решение установки, удовлетворяющее этому требованию, представлено в публикации [1].

Возвращаясь к проблеме применимости равновесного допущения в этом случае, следует подчеркнуть, что все продукты переработки газифицируемого сырья проходят в такой установке достаточно протяженную высокотемпературную зону, где диоксины и фураны приходят к своему равновесному значению, близкому к нулевой концентрации. Остальные продукты газификации выходят на равновесные значения, за исключением оксидов азота, роль которых в энергетике исследуемых процессов весьма незначительна [1].

4. Термодинамический анализ процессов переработки донного ила с применением плазменных технологий

4.1. Стехиометрический по производству синтез-газа режим. Анализ эффективности конверсии донного ила в синтез-газ с применением плазменной технологии, требующий расчета энергетических показателей и адекватного учета состава получаемых продуктов газификации при условии достижения максимума энтропии в той или иной реакции (см. формулу (11) в [3]), выполнен сочетанием аналитических методов и программы «ТЕРРА». На первой стадии рассматривалась «идеальная» реакция конверсии, в которой в числе реагентов в отличие от (4) присутствует также кислород, а среди продуктов реакции только компоненты синтез-газа:



где K , L , M — коэффициенты, определяющие содержание таких ингредиентов, как пар и кислород, а также содержание водорода в продуктах реакции соответственно.

Другими словами, идет речь о стехиометрической реакции по отношению к производству синтез-газа. Смысл энергетического члена Q_{Tr} раскрыт выше в связи с реакцией (4). В наших расчетах, как и ранее, принято значение $T_p = 1250$ К, исходя из результатов моделирования процесса с помощью программы «ТЕРРА»; из него следовало, что при этой температуре продукты газификации уже соответствуют «идеальному» процессу конверсии, в котором нет «лишних» компонент.

Более строго говоря, массовая доля следов CO_2 , H_2O и CH_4 среди продуктов газификации не превышает 1–2 %. Случаю $L = 0$ соответствует «чисто» пароплазменная, а $\Delta Q = 0$ — «чисто» парокислородная технологии, хотя их противопоставление, как это было показано ранее, не имеет смысла. Тем более, что в обоих случаях в процессе присутствуют характерные для этих технологий атомы кислорода и атомы водорода, изначально входящие в состав газифицируемого донного ила.

Для отмеченных предельных значений L коэффициент K принимает значения $K_{max} = 0,5$ и $K_{min} = 0$ соответственно. Однако, реакции (14) могут соответствовать и промежуточные значения коэффициентов K и L . Их функциональные зависимости определяются на основе массовых

балансов в этой реакции подобно тому, как это сделано в формулах (48) и (49) в работе [3]:

— по кислороду

$$1 \cdot 0,5 + K + 2 L = 1,$$

откуда

$$L = 0,25 - 0,5 K; \tag{15}$$

— по водороду

$$1 \cdot 2,5 + 2 K = 2 M,$$

откуда

$$M = 1,25 + K. \tag{16}$$

Для наглядности зависимость (15), характеризующая содержание кислорода L в функции от количества вводимого плазмотроном пара K , представлена на рис.3,а линией 1, а линией 4 — тепловая мощность, вводимая в реактор плазменной струей при ее номинальной энтальпии $H_{PL} = 3,6$ кВт·ч/кг в соответствии с формулой

$$Q_{PL} = H_{PL} m_{H_2O},$$

где m_{H_2O} соответствует массе воды в струе, вводимой на 1 кг реагентов.

Указанное значение энтальпии соответствует умеренному по энергонапряженности режиму работы плазмотрона, используемого в наших разработках [1]. В принципе, могут быть достигнуты и более высокие значения энтальпии плазмы, соответствующие форсированному режиму работы пароводяного плазмотрона. Например, в публикации [22] достигнуто ее максимальное значение 80 кДж/г = $22,2$ кВт·ч/кг. Они приведены для однородной плазмы в функции от ее температуры; это не совсем то же, что энтальпия плазменной струи, которая характеризуется значительной температурной неоднородностью по ее сечению [23]. Тем не менее, в недавних экспериментах [24] энтальпия пароплазменной струи составляла близкие значения $4,2$ – $7,3$ кВт·ч/кг.

При газификации донного ила имеет место качественно иная ситуация, чем при конверсии биогаза [3] (см. рис.3). Например, при небольших значениях K , характеризующего количество влаги в смеси реагентов, значение $\Delta Q < 0$. Это

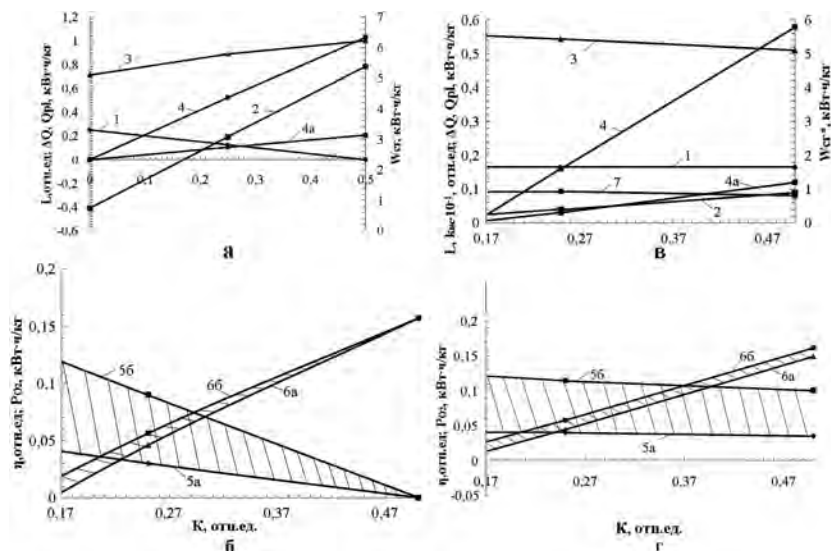


Рис.3. Основные закономерности, характеризующие стехиометрический (а, б) и нестехиометрический (в, г) режимы газификации донного ила в функции от введенного в реакцию количества водяного пара K — мольные и энергетические соотношения (а, в), учет энергозатрат на производство кислорода и показатели энергоэффективности процесса (б, г): 1 — содержание кислорода L , вводимого в реактор; 2 — дополнительная энергия ΔQ , которую следует ввести в объем для достижения рабочей температуры; 3 — энергия получаемого синтез-газа W_{CG} и W_{CG}^* ; 4, 4а, — энергия, вводимая пароводяной плазменной струей Q_{PL} при ее энтальпиях $H_{PL} = 3,6; 0,72$ кВт·ч/кг соответственно; 5а, 5б — энергозатраты на производство кислорода при удельных расходах $0,35$ и 1 кВт·ч/нм³; 6а, 6б — показатели энергоэффективности процесса при указанных энергозатратах на производство кислорода; 7 — коэффициент нестехиометрии $K_{НС}$.

Таблица 3. Расчетные параметры, характеризующие стехиометрический процесс конверсии донного ила при его влажности 10 % в синтез-газ с применением плазменной технологии в зависимости от вводимого с плазменной струей дополнительного количества водяного пара К

Параметр	К, отн. ед.	
	0,25	0,5
L, отн. ед.	0,125	0
ΔQ , кВт·ч/кг	0,19	0,785
P_{PL}^C , кВт·ч/кг	0,24	0,98
P_{O_2} , кВт·ч/кг:		
$p_{O_2} = 0,35$ кВт·ч/нм ³	0,03	0
$p_{O_2} = 1$ кВт·ч/нм ³	0,09	0
W_{CG} , кВт·ч/кг	5,79	6,23
η , отн. ед.:		
$p_{O_2} = 0,35$ кВт·ч/нм ³	0,046	0,15
$p_{O_2} = 1$ кВт·ч/нм ³	0,057	0,16

соответствовало бы кислородной газификации донного ила при небольшом количестве влаги, когда температура в реакторе достигала бы более высоких значений, чем заложенное в расчет значение 1250 К. Подобное обстоятельство изложено в эмпирических исследованиях [15–17]. В работе [3] энтальпия плазменной струи при ее умеренной мощности была недостаточна для поддержания стехиометрического режима газификации, так как во всем диапазоне параметров К энергия плазменной струи была меньше, чем требуемый уровень дополнительной энергии ΔQ , которую следует ввести в объем для достижения рабочей температуры.

При отсутствии плазмотрона стехиометрический режим газификации, соответствующий реакции (14), реализуется при единственном значении $K_0 = 0,17$, которое соответствует пересечению линии 2, характеризующей требуемый уровень энергии ΔQ , с осью координат (см. рис.3,а). Она, в свою очередь, соответствует влажности донного ила около 10 %, если определить ее из состава регентов в левой части реакции (14). Это значение влажности характерно для кондиции донных илов, высушиваемых с помощью тех иных технологий сушки. Наиболее перспективной из них в настоящее время выглядит сушка под воздействием солнечного излучения, осуществляемая в хорошо освещенных и проветриваемых помещениях.

Если стоит задача получения большего количества высококачественного синтез-газа, чем это характерно для значения $K_0 = 0,17$, либо максимального обогащения его водородом, либо возникает задача сброса избыточной с точки

зрения текущих затрат энергии плазмотрона на витрификацию зольного остатка, то этого можно достичь, двигаясь в соответствии с режимом газификации вдоль по линии 2 к ее максимальному значению, соответствующему стехиометрическому режиму при $K = 0,5$. Учитывая, что наклоны линий 2 и 4 (последняя характеризует энергию, вводимую пароводяной плазменной струей Q_{PL} при ее энтальпии $H_{PL} = 3,6$) близки между собой, этот режим легко реализовать с помощью существующего плазмотрона, добавляя во влажный ил плазменную струю. Максимальное значение ΔQ , достигаемое при $K = 0,5$, составляет 0,785 кВт·ч/кг. Именно оно является ключевым для определения энергетической эффективности процесса плазменной газификации.

Область значений собственно $K = 0,17$ и вблизи нее не рассматривалась, так как программа «ТЕРРА» обнаруживает здесь значительное сажеобразование, что делает ее неприемлемой для газификации.

Энергия синтез-газа W_{CG} , получаемого из 1 кг смеси, представляет собой важнейший параметр с точки зрения конечной энергетической эффективности применяемой технологии конверсии. Она определяется, исходя из теплотворности CO и H₂ с учетом их парциального содержания в продуктах конверсии, и представлена линией 3 на рис.3,а. Во всей области параметров, где энтальпия плазмы достаточна для поддержания указанного режима газификации, величина W_{CG} достаточна, в свою очередь, для энергетического самообеспечения установки газификации, включающей в своем составе газодизельную электростанцию с КПД производства электроэнергии $\eta_{ЭЭ} \sim 0,30$ [25].

Количественно это подтверждает показатель энергетической эффективности процесса конверсии:

$$\eta = (P_{PL}^C + P_{O_2}) / W_{CG}, \quad (17)$$

в котором учтены затраты электрической энергии P_{PL}^C на производство плазменной струи с учетом КПД плазмотрона около 0,8: $P_{PL}^C = \Delta Q_{PL} / 0,8$ и на производство требуемого количества кислорода P_{O_2} . Составляющая энергетических затрат P_{O_2} в реакции конверсии, которую следует учитывать дополнительно, представлена линиями 5а и 5б на рис.3,б. Они соответствуют диапазону возможных удельных энергозатрат в технологическом процессе получения самого кислорода $p_{O_2} = 0,35-1$ кВт·ч/нм³. Результирующие значения η представлены линиями 6а и 6б.

Резюмируя эту часть работы, можно заключить, что стехиометрический режим газификации с применением плазменных технологий доста-

Таблица 4. Состав продуктов газификации в нестехиометрическом режиме при содержании кислорода $L_0 = 0,165$ согласно расчетным данным в программной среде «ТЕРРА»

Содержание воды в составе реагентов, мольная доля К	Состав продуктов газификации, мас. доли			
	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O
0,25	0,84	0,089	0,034	0,032
0,5	0,69	0,083	0,110	0,117

Таблица 5. Расчетные параметры, характеризующие нестехиометрический процесс конверсии донного ила при его влажности 10 % в синтез-газ при содержании кислорода $L_0 = 0,165$ с применением плазменной технологии в зависимости от вводимого с плазменной струей количества водяного пара К

Параметр	К, отн. ед.	
	0,25	0,5
L_0 , отн. ед.	0,165	0,165
ΔQ , кВт·ч/кг	0,04	0,09
Q_{PL} , кВт·ч/кг:		
$H_{PL} = 3,6$ кВт·ч/кг	0,16	0,58
$H_{PL} = 0,72$ кВт·ч/кг	0,03	0,12
P_{O_2} , кВт·ч:		
$P_{O_2} = 0,35$ кВт·ч/нм ³	0,040	0,035
$P_{O_2} = 1$ кВт·ч/нм ³	0,114	0,100
k_{HC} , отн. ед.	0,934	0,807
W_{CG}^* , кВт·ч/кг	5,440	5,110
η , отн. ед.:		
$P_{O_2} = 0,35$ кВт·ч/нм ³	0,015	0,023
$P_{O_2} = 1$ кВт·ч/нм ³	0,028	0,033

точен для осуществления энергетического самообеспечения работы установки газификации донного ила. Действительно, энергия синтез-газа, получаемого на 1 кг исходных углеродсодержащих реагентов в наиболее мягком по мощности плазмотрона режиме, составляет $W_{CG} = 6,23$ кВт·ч/кг (см. табл.3). С учетом КПД производства электроэнергии этого достаточно для обеспечения работы плазмотрона:

$$W_{CG} \cdot \eta_{ЭЭ} \cdot \eta_{PL} = 6,23 \cdot 0,3 \cdot 0,8 = 1,5 \text{ кВт·ч/кг,}$$

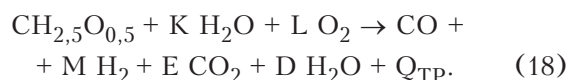
поскольку она превышает с достаточным запасом значение $\Delta Q = 0,785$ кВт·ч/кг. В этом смысле результаты анализа процесса плазменной газификации донного ила даже более оптимистичны, чем это было для конверсии биогаза в работе [3]. С другой стороны, следует сделать вывод о важности выполнения детальных оценок для других видов углеродсодержащего сы-

рья, имея в виду, что перерабатываемые отходы могут иметь различный элементный состав.

Введение значительного количества энергии с плазменной струей заметно ухудшает показатель энергетической эффективности работы установки, как это следует из рис. 3,б. Поэтому представляет интерес сопоставление его с нестехиометрическим режимом, который может быть легко реализован при том же значении $L_0 = 0,165$, что и в стехиометрическом режиме в точке $K_0 = 0,17$, однако при значениях $K > 0,18$. Таким образом, как это заключено и в первой части работы, целесообразно введение в реактор избыточного количества кислорода. Следует только учитывать, что полученные в этом подразделе количественные соотношения для стехиометрического процесса теряют свою приемлемость для нестехиометрического режима, так как введение дополнительного кислорода приводит к изменению состава получаемых продуктов газификации.

4.2. Конверсия донного ила с введением избыточного количества кислорода. Если речь идет о больших объемах переработки отходов в однородных технологических условиях, как, например, в случае иловых осадков городских станций водоочистки, то целесообразно отказаться от стехиометрического режима конверсии и перейти к использованию избыточного количества кислорода. Если при этом будет производиться синтез-газ в количестве большем, чем это нужно для самообеспечения работы установки, то станет возможной, например, дополнительная выработка электроэнергии для внешних потребителей. Это облегчит коммерциализацию проектов на основе использования подобного рода установок.

Здесь мы более детально оценим условия газификации иловых осадков в предлагаемом режиме. Рассматривается реакция, левая часть которой аналогична (14), но вследствие ее нестехиометрического характера по отношению к производству синтез-газа в правой части присутствуют дополнительные компоненты, как это следует из рассмотрения процесса в программной среде «ТЕРРА»:



Можно составить множество вариантов этой реакции с различными стехиометрическими коэффициентами. Однако фактически реализуются только такие из них, в которых удовлетворяется принцип максимума энтропии (см. формулу (11) в [3]).

Как и ранее, в стехиометрическом режиме мы пренебрегаем технологическими потерями, но уже нельзя считать, что процесс газификации обеспечивает 100 %-й выход синтез-газа из начальной массы донного ила. Поэтому при определении энергии синтез-газа следует учитывать, что из массы начальных реагентов образуются, кроме синтез-газа, также балластные компоненты. Иными словами, следует ввести поправочный коэффициент:

$$W_{\text{СГ}}^* = [(m_{\text{CO}} + m_{\text{H}_2}) / (m_{\text{CO}} + m_{\text{H}_2} + m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}})] W_{\text{СГ}} = k_{\text{НС}} W_{\text{СГ}} \quad (19)$$

Таким образом, изменение состава продуктов газификации вследствие нестехиометрического режима становится одним из факторов, непосредственно влияющим на энергетическую производительность установки газификации и ее энергетическую эффективность в соответствии с формулой (17).

Энергетические затраты на производство такого количества кислорода составляют 0,04–0,12 кВт·ч/кг в зависимости от удельных затрат на его производство (см. линии 5а и 5б на рис.3,г). Это гораздо меньше (в 7–20 раз), чем энергозатраты на производство плазменной струи в довольно энергонапряженном режиме работы плазмотрона при $H_{\text{PL}} = 3,6$ кВт·ч/кг для решения близкой задачи – осуществления процесса газификации донного ила при температуре 1250 К в стехиометрическом процессе (значение ΔQ ($K = 0,5$) = 0,785 кВт·ч/кг для линии 2 на рис.3,а).

Как и следовало ожидать, физической причиной такого эффекта стало сжигание в избыточном кислороде части ила, энерговыделение от которого обеспечивает компенсацию дефицита энергии при газификации. Об этом свидетельствует появление значительного количества паров воды и диоксида углерода среди продуктов газификации (табл.4). Однако это привело к уменьшению энергии получаемого синтез-газа в соответствии с коэффициентом нестехиометрии $k_{\text{НС}}$ (19), значения которого приведены в табл.5. Поэтому энергия синтез-газа $W_{\text{СГ}}^*$ в этом режиме заметно меньше, чем в

стехиометрическом режиме $W_{\text{СГ}}$ (ср. линии 3 на рис.3,а и 3,в).

Вариант $K > 0,17$ на рис.3,в,г отвечает тому обстоятельству, что даже при преимущественном использовании плазмотрона для витрификации зольного остатка часть его энергии неизбежно будет расходоваться на процесс газификации. Сами энергозатраты на витрификацию могут быть определены из эмпирического соотношения [26]:

$$M \text{ (кг)} = 0,35 P \text{ (кВт·ч)}, \quad (20)$$

где M – масса витрифицированного продукта; P – потребляемая электрическая энергия. Она позволяет рассчитывать энергозатраты, необходимые для процесса витрификации независимо от термодинамических расчетов, связанных с конверсией углеродсодержащего сырья.

Анализируя результаты, представленные на рис.3,в,г, следует иметь в виду, что для значений $K > 0,17$ они не являются энергетически самосогласованными. Действительно, из данных табл.5, соответствующих этим рисункам, следует, что при содержании кислорода $L_0 = 0,165$ требуется относительно небольшой дополнительный ввод в реакцию (18) тепловой энергии из расчета $\Delta Q = 0,04$ – $0,09$ кВт·ч/кг. В этой же таблице показана энергия, вводимая со струей

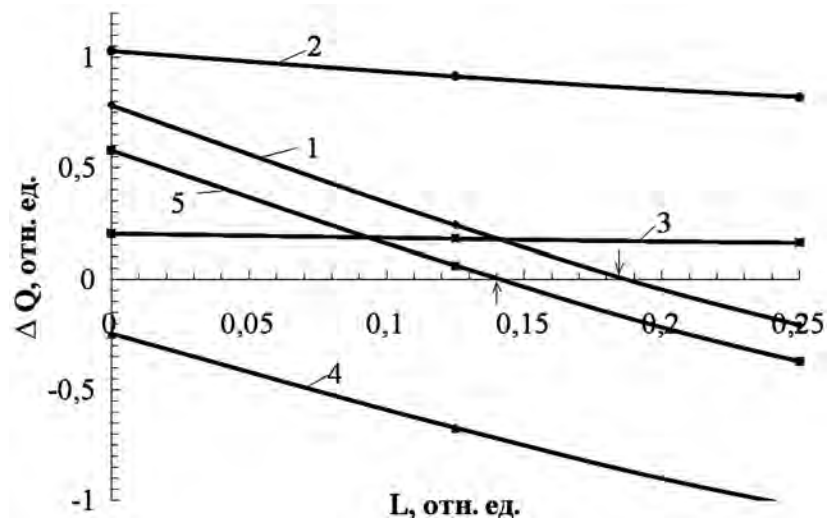


Рис.4. Пример вспомогательных графических построений для определения закономерностей самосогласованного по энергозатратам нестехиометрического режима газификации для мольного содержания водяного пара в реакции (18) $K = 0,5$: 1 – зависимость дополнительной энергии ΔQ , которую следует ввести в объем для достижения рабочей температуры от мольного содержания кислорода L ; 2, 3 – энергия, вводимая в объем реактора с плазменной струей Q_{PL} при ее энтальпиях $H_{\text{PL}} = 3,6$ и $0,72$ кВт·ч/кг соответственно (с учетом относительного уменьшения содержания пара при увеличении содержания кислорода); 4, 5 – разность энергий $\Delta Q(L) - Q_{\text{PL}}(H_{\text{PL}})$ при энтальпиях плазменной струи $H_{\text{PL}} = 3,6$ и $0,72$ кВт·ч/кг. Вертикальными стрелками указаны искомые значения решения L при энтальпиях плазменной струи $H_{\text{PL}} = 0,72$ кВт·ч/кг, а также в ее отсутствие (то есть для влажного донного ила) соответственно.

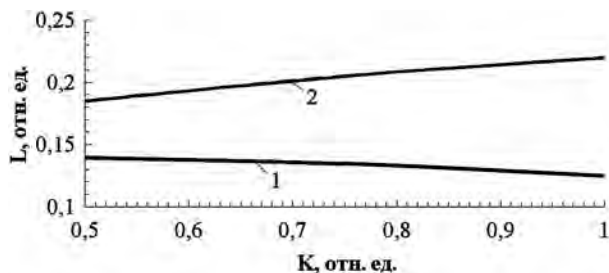


Рис.5. Сопоставление зависимостей вводимого в реакцию газификации кислорода L от количества K вводимого с плазменной струей водяного пара в нестехиометрических режимах при энтальпии плазменной струи $H_{PL} = 0,72$ кВт·ч/кг (линия 1), а также в ее отсутствие, то есть для влажного донного ила (линия 2).

плазмотрона, работающего в относительно энергонапряженном режиме при энтальпии $H_{PL} = 3,6$ кВт·ч/кг и в более «мягком» режиме $H_{PL} = 0,72$ кВт·ч/кг. Следует учесть, что при работе с влажным донным илом энергия, вводимая плазмотроном, пропорциональна $\Delta K = K - K_0$. Вводимая при этом тепловая энергия при $K = 0,5$ превышает отмеченные величины ΔQ и в отсутствие затрат энергии на витрификацию, согласно (19), приведет к перегреву внутреннего объема газификатора.

В свою очередь, расчетные данные табл.5 могут быть полезны для оценки эффективности работы установки газификации донного ила в зависимости от наличия в составе последнего минеральной массы, требующей витрификации. Для этого учтем, что при $K = 0,5$ в реактор вводится $p = (Q_{PL} - \Delta Q) / 0,8 = (0,58 - 0,09) / 0,8 = 0,6$ кВт·ч/кг избыточной энергии (при перерасчете на электрическую энергию для питания плазмотрона). Для определения допустимого содержания минеральной части в исходном донном иле воспользуемся соотношением (20). При наличии в его составе минеральной массы из расчета M на 1 кг величина продуцированной избыточной энергии, пересчитанной в электрическую, составит $p(1 - M)$, а она, в свою очередь, может расходоваться на витрификацию, согласно (20). Отсюда можно определить M :

$$M \text{ (кг)} = 0,35 p (1 - M),$$

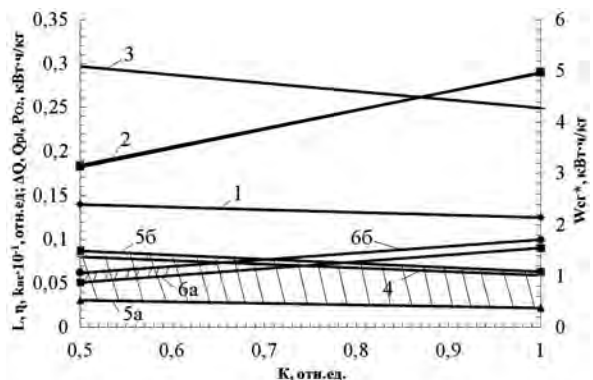
где разность в скобках характеризует количество продуктов газификации, полученных из 1 кг смеси. Следовательно, $M = 0,17$ кг.

Таким образом, данные последней колонки табл.5 для показателя энергетической эффективности установки газификации справедливы вплоть до 17 % содержания минеральной массы в донном иле, требующей витрификации.

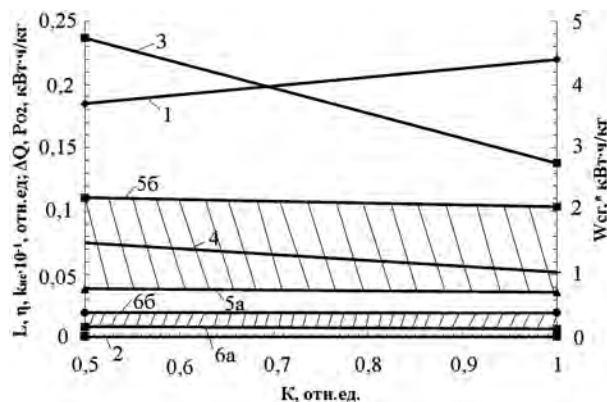
Введение эквивалентной тепловой энергии в реактор с помощью, например, газовой горелки

привело бы к значительному увеличению в его объеме продуктов сгорания, требующих в дальнейшем очистки в составе продуктов газификации, к ухудшения качества синтез-газа и в случае использования устройств удаления CO_2 из его состава вне газификатора – к необходимости наращивания их производительности.

На первый взгляд, если сопоставлять результаты сравнения показателей энергетической эффективности процессов газификации на рис.3,б и 3,в, то они не существенно различаются по абсолютным показателям. Однако в нестехиометрическом режиме на рис.3,в процесс включает также витрификацию зольного остат-



а



б

Рис.6. Основные закономерности, характеризующие энергетическую эффективность нестехиометрических режимов газификации донного ила в функции от введенного в реакцию количества водяного пара K при энтальпии плазменной струи $H_{PL} = 0,72$ кВт·ч/кг (а), а также в ее отсутствие для влажного донного ила (б): 1 – содержание кислорода L , вводимого в реактор; 2 – дополнительная энергия ΔQ , которую следует ввести в объем для достижения рабочей температуры, равная энергии, вводимой пароводяной плазменной струей Q_{PL} (последнее – за исключением влажного ила); 3 – энергия получаемого синтез-газа $W_{сг}^*$; 4 – коэффициент нестехиометрии $K_{НС}$; 5а, 5б – энергозатраты на производство кислорода при удельных расходах 0,35 и 1 кВт·ч/нм³; 6а, 6б – показатели энергоэффективности процесса при указанных энергозатратах на производство кислорода.

ка, что свидетельствует о повышении эффективности этого варианта технологии в целом. Поэтому направление, связанное с введением в реактор избыточного количества кислорода, представляется перспективным. На рис.3,а и 3,в представлены также затраты электрической энергии на производство плазменной струи с гораздо меньшей энтальпией — 0,72 кВт·ч/кг. Даже не выполняя детальных расчетов, можно прийти к выводу, что применение плазмотрона меньшей мощности привело бы к улучшению показателя энергетической эффективности процесса, представленного, на рис.3,в, так как именно уровень затрат энергии на работу плазмотрона является определяющим для эффективности процесса в этом случае.

Рассмотрена также более строгая задача самосогласованного по энергозатратам нестехиометрического режима газификации. Она решалась на основе варьирования при заданном значении K значений L в реакции (18) с таким расчетом, чтобы определить, при каких значениях L достигается компенсация возникающего дефицита тепловой энергии ΔQ за счет вводимой с указанным количеством K водяного пара энергии плазменной струи при той или иной ее энтальпии. Иными словами, определялось, при каких значениях L достигается условие $\Delta Q(L) = Q_{PL}(K, H_{PL})$ или $\Delta Q(L) - Q_{PL} = 0$. Пример соответствующего вспомогательного графика представлен на рис.4 при $K = 0,5$. В случае $Q_{PL} = 0$ такие зависимости могут быть полезны для определения влияния влажности донного ила на результат его газификации.

По совокупности результатов, полученных в соответствии с методикой, которую иллюстрирует рис.4, можно определить основные соотношения для самосогласованных по энергозатратам нестехиометрических режимов газификации на примере использования плазмотронов относительно небольшой мощности ($H_{PL} = 0,72$ кВт·ч/кг) и в отсутствие плазмы, а именно: влияние влаги донного ила на показатели его газификации.

Наиболее общие закономерности целесообразного введения в реакцию газификации кислорода L в зависимости от количества вводимой с плазменной струей водяного пара или начальной влажности донного ила представлены на рис.5. Как и следовало ожидать, увеличение содержания влаги в донном иле сопровождается увеличением L , что связано с необходимостью сжигания большего количества ила для того, чтобы компенсировать наличие влаги (линия 2). Наоборот, введение в реактор плазменной струи даже от маломощного плазмотрона

при эквивалентном количестве влаги за счет ее тепловой энергии приводит к некоторому снижению L при увеличении K (линия 1).

Характерно, что на рис.4 отсутствует пересечение линии 4 с горизонтальной осью координат. Это свидетельствует о том, что энтальпия плазменной струи $H_{PL} = 3,6$ кВт·ч/кг в этом режиме работы газификатора является избыточной.

Основные зависимости, представляющие в конечном итоге эффективность нестехиометрического процесса газификации при небольшой энтальпии ($H_{PL} = 0,72$ кВт·ч/кг) плазменной струи и в ее отсутствие, то есть для влажного донного ила, показаны на рис.6.

В первом из этих случаев показатель энергетической эффективности во всем диапазоне изменения содержания влаги в реагирующей смеси K не превышает показателя 0,1. Еще лучше показатель эффективности парокислородной газификации, то есть во втором случае, когда его величина не превышает значения 0,05. Однако следует отдавать себе отчет, что в пространстве реактора зоны витрификации и газификации разделены не настолько, чтобы часть энергии плазменной струи не расходовалась на процессы газификации. Поэтому полагаем, что в целом предлагаемая технология может обеспечить энергетическую эффективность процесса газификации донных илов с показателем не хуже 0,1.

Таким образом, практически во всех случаях, представленных на рис.6, расход получаемого синтез-газа на производство электроэнергии с помощью газодизельной электростанции для осуществления процесса газификации углеродсодержащей компоненты донного ила

$$(P_{O_2} + \Delta Q_{PL}/0,8)/\eta_{ЭЭ} = \eta W_{СТ}^* / \eta_{ЭЭ} \sim 0,1 W_{СТ}^* / 0,3 \sim 0,33 W_{СТ}^* \quad (21)$$

составляет только часть общего объема его производства. В варианте, представленном последней формулой, эта часть составляет треть энергии получаемого синтез-газа. При получении этих соотношений использована формула (17). Оставшаяся часть может использоваться, например, для производства электрической энергии внешним потребителям, что будет способствовать коммерциализации этой разработки.

Дальнейшему повышению эффективности предлагаемой технологии может способствовать переход к более эффективным методам производства электроэнергии из производимого синтез-газа. Это приведет к увеличению значения $\eta_{ЭЭ}$ в формуле (21) и, следовательно, к дальнейшему уменьшению доли синтез-газа, используемого для самообеспечения работы установки

газификации. В настоящее время такие перспективы ассоциируются, в первую очередь, с технологиями топливных элементов [27], имеющих существенно более высокий КПД, чем газодизельные электростанции.

В заключение следует подчеркнуть чувствительность получаемых оценок от выбранного состава углеродсодержащего газифицируемого сырья. Дальнейшее развитие этих исследований требует варьирования состава сырья, а также более строго учета других компонентов донного ила согласно данным, например, работы [4]. Это же относится и к другим видам опасных отходов. Данная работа представляет собой методическую основу для развития таких исследований.

Выводы

Количественная оценка энергетической эффективности процесса пароплазменной конверсии донных илов станций водоочистки свидетельствует, что технологии на ее основе могут функционировать в режиме, достаточном для энергетического самообеспечения. Действительно, теплотворность синтез-газа в таком процессе составляет около 6 кВт·ч/кг. Эта величина существенно превышает требуемые затраты электроэнергии на производство 1 кг синтез-газа в стехиометрическом процессе, которые не превышают 1 кВт·ч/кг. Таким образом, даже с учетом относительно низкого коэффициента использования топлива (около 30 %) в процессах генерации электрической энергии с помощью газодизельной электростанции энергетические затраты на обслуживание функционирования установки предполагают использование только части получаемого синтез-газа. Это создает хорошие предпосылки для высокой энергетической эффективности процесса переработки различных отходов близкого состава в условиях мобильных установок, так как практически исключается необходимость привлечения дополнительных источников энергии.

Дополнительное существенное повышение эффективности конверсии достигается при частичном избыточном введении в число реагентов кислорода. Это позволяет реализовать полномасштабный процесс WTE — производство дополнительной электроэнергии в результате переработки иловых осадков сточных вод даже с учетом дополнительного расхода электрической энергии на витрификацию минеральной части донного ила, содержащего в своем составе тяжелые металлы. В экономических реалиях национальной экономики это будет способствовать коммерциализации такого рода технологий.

Выполнение настоящей работы поддержано Министерством образования и науки Украины (проект «Разработка паро-плазменной технологии переработки донных илов станций аэрации») и Национальной академией наук Украины (программы «Перспективные исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу и плазменным технологиям» и «Фундаментальные аспекты возобновляемой водородной энергетики и топливно-элементных технологий»).

Список литературы

1. Жовтянский В.А., Петров С.В., Колесник В.В. и др. Конверсия углеродсодержащего сырья с применением плазменных технологий // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2012. — № 5. — С. 15–32.
2. Постановление Кабинета Министров Украины от 27 июля 2016 г. № 476 «О государственном заказе на научно-технические (экспериментальные) разработки и научно-техническую продукцию в 2016 году».
3. Жовтянский В.А., Орлик В.Н., Петров С.В., Якимович М.В. Общие принципы переработки отходов с извлечением их энергетического потенциала на основе плазменных технологий. 1. Экологические требования, термодинамика процесса и его энергетическая эффективность // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2015. — № 4. — С. 24–46.
4. Бондар О.И., Лозовицкий П.С., Машков О.А., Лозовицкий А.П. Екологічний стан накопичених осадів стічних вод м. Києва // Екологічні науки. — 2014. — № 7. — С. 38–53.
5. Жовтянський В.А., Дудник О.М., Якимович М.В. Одержання синтез-газу з бурого вугілля та мулу з використанням парового плазмотрона // Новини енергетики. — 2015. — № 4. — С. 26–28.
6. Равич М.Б. Эффективность использования топлива. — М.: Наука, 1977. — 258 с.
7. Жовтянський В.А., Якимович М.В. Плазмові технології конверсії відновлювальної сировини як приклад вирішення проблеми переробки мулових осадів стічних вод // Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях / За ред. В.В.Скорохода, Ю.М. Солоніна. — Київ: КІМ, 2015. — С. 75–83.
8. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. — М.: Металлургия, 1994. — 353 с.
9. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. — М.: Мир, 2002. — 461 с.
10. Грим Г. Спектроскопия плазмы. — М.: Атомиздат, 1969. — 452 с.
11. Drawin H.W. Validity conditions for local thermodynamic equilibrium // Zeit. fur Physik. — 1969. — Bd. 228. — S. 99–119.
12. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. — М.: Наука, 1982. — 375 с.

13. Жовтянський В.А., Лелюх Ю.І., Ткаченко Я.В. Вплив перенесення випромінювання на відхилення від рівноважного стану щільної електродугової плазми: критеріальний підхід // Укр. фіз. журн. — 2012. — Т. 57, № 3. — С. 311–321.
14. Жовтянський В.А. Вплив факторів нерівноважності на розпад електродугової плазми. 1. Дифузійні процеси в об'ємі плазми // Укр. фіз. журн. — 1999. — Т. 44, № 11. — С. 1364–1370; 2. Роль пристінних процесів // Там само. — 2000. — Т. 45, № 1. — С. 50–56; 3. Роль випромінювання і розширення плазми // Там само. — 2000. — Т. 45, № 2. — С. 236–242.
15. Доброхотов Н.Н. Расчет газогенераторов и генераторного процесса. — Петроград, 1922. — 33 с.
16. Струговщиков Д.П. Расчет генераторного газа по методу проф. Н.Н.Доброхотова // Металлург. — 1929. — № 1. — С. 30–34.
17. Доброхотов Н.Н., Копытов В.Ф. Теория и расчет газогенераторного процесса // Теория и практика металлургии. — 1937. — № 1. — С. 25–40.
18. Дешалиг Г.И. Расчеты процессов газификации топлива. — Харьков : Изд-во Харьк. ун-та, 1959. — 168 с.
19. Доброхотов Н.Н. К динамике диффузионных процессов. — Киев : Изд-во АН УССР, 1948. — 30 с.
20. Гинзбург Д.Б. Газификация низкосортного топлива. — М. : Промстройиздат, 1950. — 172 с.
21. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration waste // Official Journal of the European Communities. — 2000. — Vol. 332. — P. 91–111.
22. Михайлов Б.И. Регенерация тепла в паровихревых электродуговых плазмотронах. Автоплазмотроны // Теплофизика и аэромеханика. — 2005. — Т. 12, № 1. — С. 135–148.
23. Донской А.В., Клубникин В.С., Салангин А.А. Влияние движения газа на характеристики двухтемпературной аргонодуговой плазмы в канале // Журн. техн. физики. — 1983. — Т. 53, № 4. — С. 670–676.
24. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Радько С.И. и др. Пароводяной плазмотрон для газификации твердых топлив // VIII Всерос. конф. с междунар. участием «Горение твердого топлива» (Новосибирск, 13–16 нояб. 2012 г.). — Новосибирск : Ин-т теплофизики СО РАН, 2012. — С. 61–64.
25. Вербовский В.С. Возможности применения газодизельных электростанций в Украине // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2003. — № 1. — С. 13–18.
26. Leal-Quiros E. Plasma Processing of Municipal Solid Waste // Brazilian Journal of Physics. — 2004. — Vol. 34, № 4B. — P. 1587–1593.
27. Дудник А.Н. Направления использования и развития энергетических установок на топливных элементах // Тепловая энергетика / Под ред. П.Омеляновского, И.Мысака. — Львов : Укр. технології, 2010. — С. 346–358.

Поступила в редакцию 28.04.16

Жовтянський В.А., чл.-кор. НАН України, докт. фіз.-мат. наук,

Орлик В.М., канд. техн. наук,

Петров С.В., докт. техн. наук, **Якимович М.В.**

Інститут газу НАН України, Київ

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

Загальні принципи переробки відходів з вилученням їхнього енергетичного потенціалу на основі плазмових технологій. 2. Газифікація мулових осадів станцій водоочищення

Роботу присвячено розвитку технологій переробки небезпечних вуглецевмісних відходів, у першу чергу, мулових осадів станцій водоочищення із застосуванням плазмових джерел енергії. Ставилася задача розширення перспектив їхнього використання на основі можливості комерціалізації запропонованих технологій. Відповідно до термодинамічного підходу, запропонованого в першій частині цієї роботи, виконано оцінки продуктивності та енергетичної ефективності таких установок газифікації в залежності від потужності використовуваних плазмотронів. Показано, що в стехіометричному з точки зору виробництва синтез-газу режимі енергетичні витрати на здійснення процесу газифікації близькі до рівня енергії від одержуваного синтез-газу. Це створює хороші передумови для високої енергетичної ефективності процесу переробки різних відходів близького складу в умовах мобільних установок, оскільки практично виключається необхідність залучення додаткових джерел енергії. У режимі додаткового введення в

процес газифікації кисню витрати синтезу газу на власні потреби установки складають близько 30 %. Частина, що залишилася, може використовуватися для виробництва електричної енергії зовнішнім споживачам, що буде сприяти комерціалізації розробки. Таким чином, в запропонованому варіанті технологія переробки відповідає загальній ідеї значної кількості публікацій у світовій літературі, відомій як Waste to Energy. *Бібл. 27, рис. 6, табл. 5.*

Ключові слова: альтернативні газові палива, синтез-газ, плазмо-парова газифікація, плазмотрон, небезпечні відходи, мулові осади станцій водоочищення, вітрифікація.

Zhovtyansky V.A., *Corr. Member of National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,*
Orlyk V.N., *Candidate of Technical Sciences,*
Petrov S.V., *Doctor of Technical Sciences,* **Iakymovych M.V.**
The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
39, Degtyarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: zhovt@ukr.net

The General Principles of Waste Processing with Recovery of their Energy Potential on the Basis of Plasma Technologies. Part II. Gasification of the Sewage Sludge of Wastewater Treatment Plants

The work is dedicated to the development of technologies for processing of carbon-containing hazardous waste, in first of all – the sewage sludge of wastewater treatment plants, based on the use of plasma energy sources. The aim was to enhance prospects of their use on the basis of opportunities for commercialization of the proposed technology. In accordance with the thermodynamic approach proposed in the first part of this paper, evaluate performance of the facilities of gasification based on the use of plasma-steam technology depending on the power used by the plasma torches as well as their energy efficiency was performed. It is shown that in the stoichiometric mode of the synthesis gas production the energy costs of the gasification process are close to the level of the synthesis gas energy to be obtained. This provides good preconditions for high energy efficiency of processing of various wastes of similar composition in conditions of mobile equipments, as practically eliminated the need for additional sources of energy. In the mode of additional introduction of oxygen in gasification process, the consumption of synthesis gas for own needs equipments, is about 30 %. The rest can be used for the production of electricity to external consumers that will promote commercialization of development. Thus, in the proposed variant the processing technology correspond to the general idea of numerous publications in the world literature, known as the Waste to Energy. *Bibl. 27, Fig. 6, Tab. 5.*

Key words: alternative gas fuel, plasma-steam gasification, plasma torch, synthesis gas, hazardous waste, sewage sludge of wastewater treatment plants, vitrification.

References

1. Zhovtyansky V.A., Petrov S.V., Kolesnyk V.V., Orlyk V.N., Lelyukh Ju.Y., Nevzglyad Y.O., Goncharuk Ju.A., Iakymovych M.V. Conversion of carbonaceous renewable raw materials by using plasma technology, *Energotekhnologii i resursozbezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2012, (5), pp. 15–32. (Rus.)
2. Postanovlenie Kabinetu Ministrov Ukrainy ot 27 ijulja 2016 g. №476 «O gosudarstvennom zakaze na nauchno-tehnicheskie (jeksperimental'nye) razrabotki i nauchno-tehnicheskiju produkciju v 2016 godu».
3. Zhovtyansky V.A., Orlyk V.N., Petrov S.V., Iakymovych M.V. [The General Principles of Waste Processing with Recovery of their Energy Potential on the Basis of Plasma Technologies. Part I. Environmental Requirements, the Thermodynamics of

- the Process and its Energy Efficiency], *Jenergotehnologii i resurso- sberezhennie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2015, (4), pp. 24–46. (Rus.)
4. Bondar O.I., Lozovic'ky P.S., Mashkov O.A., Lozovic'ky A.P. [Ecological state of accumulated sewage sludge in Kiev], *Ekologichni nauky*, 2014, (7), pp. 38–53. (Rus.)
 5. Zhovtyansky V.A., Dudnyk O.M., Iakymovych M.V. Oderzhannja sintez-gazu z burogo vugillja ta mulu z vikoristannjam parovogo plazmotrona, *Novyny energetyky*, 2015, (4), pp. 26–28. (Ukr.)
 6. Ravich M.B. [Efficiency of fuel use], Moscow : Nauka, 1977, pp. 258. (Rus.)
 7. Zhovtyansky V.A., Iakymovych M.V. Plazmovi tehnologii konversii vidnovljuval'noi sirovini jak prikklad virishennja problemi pererobki mulovih osadiv stichnih vod, In: Voden' v al'ternativnij energetici ta novitnih tehnologijah / Ed. V.V.Skorohoda, Ju.M. Solonina, Kiev : KIM, 2015, pp. 75–83. (Ukr.)
 8. Vatolin N.A., Moiseev G.K., Trusov B.G. [Thermodynamic modeling in high temperature inorganic systems], Moscow : Metallurgy, 1994, 353 p. (Rus.)
 9. Prigozhin I., Kondepudi D. [Modern Thermodynamics. From Heat Engines to dissipative structures], Moscow : Mir, 2002, 461 p. (Rus.)
 10. Grim G. Spektroskopija plazmy, Moscow : Atomizdat, 1969, 452 p. (Rus.)
 11. Drawin H.W. [Validity conditions for local thermodynamic equilibrium], *Zeit. fuer Physik*, 1969, (228), pp. 99–119. (De)
 12. Biberman L.M., Vorob'ev V.S., Jakubov I.T. Kinetika neravnovesnoj nizkotemperaturnoj plazmy, Moscow : Nauka, 1982, 375 p. (Rus.)
 13. Zhovtyansky V.A., Lelyuh Yu.I., Tkachenko Ya.V. Vplyv perenesennja vyprominjuvannja na vidhylennja vid rivnovazhnogo stanu shhil'noi' elektrodugovoi' plazmy: kryterial'nyj pidhid, *Ukrai'ns'kyj fizychnyj zhurnal*, 2012, 57 (3), pp. 311–321. (Ukr.)
 14. Zhovtyansky V.A. Vplyv faktoriv nerivnovazhnosti na rozpad elektrodugovoi plazmy. 1. Dyfuzijni procesy v objemi plazmy, *Ukrainskyj fizychnyj zhurnal*, 1999, 44 (11), pp. 1364–1370. (Ukr.) 2. Rol' prystinnyh procesiv, *Ukrainskyj fizychnyj zhurnal*, 2000, 45 (1), pp. 50–56. (Ukr.) 3. Rol' vyprominjuvannja i rozshyrennja plazmy, *Ukrainskyj fizychnyj zhurnal*, 2000, 45 (2), pp. 236–242. (Ukr.)
 15. Dobrohotov N.N. Raschet gazogeneratorov i generatornogo processa, Petrograd, 1922, 33 p. (Rus.)
 16. Strugovshhikov D.P. Raschet generatornogo gaza po metodu prof. N.N. Dobrohotova, *Metallurg*, 1929, (1), pp. 30–34. (Rus.)
 17. Dobrohotov N.N., Kopytov V.F. Teorija i raschet gazogeneratornogo processa, *Teorija i praktika metallurgiji*, 1937, 1, pp. 25–40. (Rus.)
 18. Deshalit G.I. Raschety processov gazifikacii topliva, Khar'kov : Izdatel'stvo Khrkovskogo universiteta, 1959, 168 p. (Rus.)
 19. Dobrohotov N.N. K dinamike diffuzionnyh procesov, Kiev : Izdatel'stvo AN USSR, 1948, 30 p. (Rus.)
 20. Ginzburg D.B. Gazifikacija nizkosortnogo topliva, Moscow : Promstrojzdat, 1950, 172 p. (Rus.)
 21. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration waste, *Official Journal of the European Communities*, 2000, 332, pp. 91–111.
 22. Mihajlov B.I. Regeneracija tepla v parovihrevykh jelektrodugovykh plazmotronah. Avtoplazmotrony, *Teplofizika i ajeromehanika*, 2005, 12 (1), pp. 135–148. (Rus.)
 23. Donskoj A.V., Klubnikin V.S., Salangin A.A. Vlijanie dvizhenija gaza na harakteristiki dvouh temperaturnoj argonodugovoj plazmy v kanale, *Zhurnal tehniczeskoj fiziki*, 1983, 53 (4), pp. 670–676. (Rus.)
 24. Anshakov A.S., Urbah Je.K., Rad'ko S.I., Urbah A.Ye., Faleev V.A. Parovodjanoj plazmotron dlja gazifikacii tverdyh topliv, *8th Vserossijskaja konferencija s mezhdunarodnym uchastiem «Gorenie tverdogo topliva»* (Novosibirsk, 13–16 nojabrja 2012 g.), Novosibirsk : Institut teplofiziki im. S.S.Kutateladze SO RAN, 2012, pp. 61–64. (Rus.)
 25. Verbovskij V.S. Vozmozhnosti primenenija gazodizel'nyh jelektrostancij v Ukraine, *Jekotehnologii i resursosberezhenie [Ecotechnologies and Resource Saving]*, 2003, (1), pp. 13–18. (Rus.)
 26. Leal-Quiros E. Plasma Processing of Municipal Solid Waste, *Brazilian Journal of Physics*, 2004, 34 (4B), pp. 1587–1593.
 27. Dudnyk A.N. Napravlenija ispolzovanija i razvitija energeticeskikh ustanovok na toplivnyh elementah, *Teplovaja energetika* / Ed. P.Omeljanovskogo, I.Mysaka, L'vov : Ukr. tehnologii, 2010, pp. 346–358. (Ukr.)

Received April 28, 2016