

Утилизация и биodeградация отходов

УДК 502.65:504.5:542.8

DOI: 10.25514/CHS.2017.2.10993

**ПЛАЗМЕННАЯ ПЕРЕРАБОТКА НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ:  
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ**

*А. В. Артемов\**, *А. В. Переславцев*, *С. А. Воцинин*, *В. М. Кулыгин*

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва,  
\*e-mail: arsenyart@mail.ru

Поступила в редакцию 16.10.2017 г.

В статье приведены результаты технологического и экономического анализа процесса переработки нефтесодержащих отходов в высокотемпературном плазменном конвертере. Полученные результаты расчетов свидетельствуют о перспективности использования плазменной технологии для ликвидации нефтесодержащих отходов при приемлемом сроке окупаемости и рентабельности. Данный способ ликвидации отходов обеспечивает практически полное отсутствие загрязнения атмосферы токсичными продуктами типа фуранов и диоксинов. Кроме того, вместо опасного зольного остатка, получаемого при обычном сжигании, продуктом плазменной технологии является экологически безопасный базальтоподобный шлак неорганической природы, который может быть использован далее, так же, как получаемые в данном процессе электроэнергия и тепло.

*Ключевые слова:* переработка нефтяных отходов, плазмохимия, экономический анализ, получение электроэнергии, базальтоподобный шлак, срок окупаемости, внутренняя норма рентабельности, чистая приведенная стоимость, пирогаз.

**ВВЕДЕНИЕ**

Приоритетной проблемой химической безопасности является ликвидация нефтесодержащих отходов: тяжелых нефтяных остатков; грунтов, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, нефтешламов и др., поскольку они являются одними из основных загрязнителей окружающей среды и фактором опасности для здоровья человека [1-3].

По оценкам экспертов, в Российской Федерации ежегодно теряется более 25 млн. тонн нефти и 12 млн. тонн нефтепродуктов, из которых собирается и перерабатывается менее 10% [4]. Как правило, накопление таких отходов самого разнообразного состава осуществляется на специально оборудованных для этого площадках или в бункерах, при этом их сортировка и классификация не производится. Помимо этого, большое количество не утилизируемых нефтесодержащих отходов хранятся на промышленных предприятиях. Таким образом, решение проблемы утилизации нефтесодержащих отходов в современных условиях имеет очень важное значение и ее актуальность не подлежит сомнению.

В настоящее время накоплен значительный опыт по утилизации различных нефтесодержащих отходов. Среди множества различных способов

ликвидации отходов такого рода, широко известны и часто применяются термические способы уничтожения отходов, самым простым из которых является сжигание. Сравнительная характеристика термических способов переработки отходов приведена в таблице 1.

**Таблица 1.** Сравнительная оценка технологий термической переработки отходов

Критерии оценки	Технология термической переработки							
	1*	2*	3*	4*	5*	6*	7*	8*
1. Общие критерии	<b>265</b>	<b>235</b>	<b>150</b>	<b>-125</b>	<b>-90</b>	<b>35</b>	<b>80</b>	<b>250</b>
2. Производство энергии и материалов:	<b>115</b>	<b>75</b>	<b>75</b>	<b>35</b>	<b>20</b>	<b>105</b>	<b>85</b>	<b>105</b>
-производство тепловой энергии,	20	20	20	20	20	20	20	20
-производство тепловой энергии,	10	10	10	10	10	10	10	10
-соответствие нормативным требованиям,	15	15	15	15	0	15	15	15
-производство электрической энергии,	30	30	30	-30	-30	30	30	20
-разность между производимой и потребляемой энергией,	20	0	0	0	0	10	10	20
-дополнительное производство энергоносителей в производственном цикле,	20	0	0	20	20	20	0	20
-получение продукции								
3. Экологические критерии:	<b>185</b>	<b>20</b>	<b>45</b>	<b>140</b>	<b>128</b>	<b>105</b>	<b>115</b>	<b>130</b>
-наличие отдельных систем сбора и удаления шлака и золы,	15	-15	-15	15	15	15	15	15
-возможность утилизации шлака,	15	15	15	15	15	15	15	15
-возможность обезвреживания золы,	20	-20	-20	20	20	20	20	20
-удельный объем дымовых газов,	25	0	10	25	13	15	20	10
-возможность подавления вредных примесей,	90	20	35	45	45	20	25	50
-наличие запаха	20	20	20	20	20	20	20	20
4. Прочие критерии	<b>35</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>20</b>
<b>ИТОГО</b>	<b>600</b>	<b>340</b>	<b>280</b>	<b>55</b>	<b>63</b>	<b>255</b>	<b>300</b>	<b>505</b>

Примечание: 1\* - максимальная сумма баллов; 2\* - слоевое сжигание; 3\* - кипящий слой; 4\* - шлаковый расплав; 5\* - электрошлаковый расплав; 6\* - пиролиз + сжигание; 7\* - газификация; 8\* - термическая плазма.

Как видно из данных этой таблицы, предпочтительным термическим методом переработки отходов является высокотемпературная плазменная технология (номер 8\*), которая, с одной стороны, исключает образование высокотоксичной золы (вместо золы по этой технологии образуется экологически безопасный стекловидный базальтоподобный шлак, пригодный для производства неорганических волокон), а, с другой стороны, позволяет получать синтез-газ, который может быть использован для производства водорода и/или моторного топлива [5, 6]. Еще одним существенным преимуществом плазменного способа по сравнению, например, со сжиганием является практически полное отсутствие загрязнения атмосферы такими

токсичными веществами, как фураны и диоксины [7]. Таким образом, результатом плазменной технологии переработки нефтесодержащих отходов является получение небольшого объема безопасных продуктов неорганической природы при отсутствии токсичных органических продуктов.

### **ПЛАЗМЕННАЯ ПЕРЕРАБОТКА НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ**

Применение плазменных технологий для переработки нефтесодержащих отходов и тяжелых нефтяных остатков достаточно хорошо известно. Так, например, известен способ, в котором переработку тяжелых смол, содержащих эмульсионную воду и кокс, проводят путем плазмохимического пиролиза с последующей закалкой продуктов и их разделением [8]. Сырье предварительно гомогенизируют, продукты пиролиза конденсируют и направляют в основное производство. Метан-водородную фракцию после ее выделения используют в качестве плазмообразующего газа и/или котельного топлива. Такая технология позволяет организовать переход к малоотходной замкнутой системе комплексной переработки сырья за счет утилизации экологически опасных отходов нефтехимической и химической промышленности, а также увеличить степень использования сырья и выход конечного продукта.

В работе [7] тяжелые нефтяные остатки подвергают плазмохимическому пиролизу в струе водородсодержащего газа с получением пирогаза, технического углерода и переводом сернистых соединений в сероводород. Продукты пиролиза очищают от технического углерода, сероводород подвергают диссоциации в СВЧ-плазме с получением полимерной серы и водорода, возвращая последний на стадию пиролиза. Из очищенных газов синтезируют моторное топливо. Способ позволяет расширить сырьевую базу, повысить эффективность процесса переработки и увеличить степень использования сырья. Известно проведение гидрокрекинга тяжелых углеводородных фракций [9] с использованием методов плазмохимии. Предварительно подогретую до 360-370°C тяжелую углеводородную фракцию подвергают «бомбардировке» ионами водорода и ионами гидроксильной группы в реакторе без доступа кислорода, при этом ионы водорода и ионы гидроксильной группы подают в камеру в виде плазмы. Способ реализуется в устройстве для гидрокрекинга тяжелых углеводородных фракций, содержащем реактор, имеющий датчик уровня, датчик температуры, патрубок выхода непрореагировавшей части углеводородных фракций в парообразном состоянии. В верхней части реактора установлен плазмотрон с соплом, а в нижней его части патрубок подачи тяжелых углеводородных фракций с форсункой, установленной с возможностью регулирования расстояния от сопла плазмотрона до ее верхней части.

Гидрокрекинг с использованием плазменных технологий описан в патенте [10]. Предварительно подогретую до 350°C тяжелую углеводородную фракцию подвергают воздействию плазмы для расщепления в зоне высокой температуры углеводородных молекул на атомы без доступа кислорода, последующей «бомбардировке» ими других углеводородных цепочек, дроблению их и гидрированию в зоне реакции, приводящему к образованию

легких углеводородных фракций. Плазма представляет собой ионизированный высокотемпературный газ.

В патенте [11] речь идет о переработке высоковязких нефтяных остатков – мазута и гудрона. Подчеркивается, что в последние годы в качестве одного из вариантов углубления переработки тяжелых нефтей и мазута предлагается использование мощного деструктивного процесса пиролиза в плазменной струе инертного газа, водородсодержащего газа, азота, обладающего уникальными возможностями, как по избирательности химических реакций, так и по простоте реализации технологического процесса. Интенсивность протекания химических реакций зависит от многих факторов, главными из которых являются температура газа и сырья, мольное соотношение между теплоносителем и сырьем, состояние возбужденности молекул, скорость протекания реакций, процессы теплообмена газодинамики, электродинамики и др. Кинетическое описание плазмохимических технологических процессов позволяет проследить их развитие во времени с учетом температуры, давления, вида исходного сырья. Исследования проводили в плазменном генераторе с продольным обдувом дуги и с вихревой стабилизацией дуги. Нагретая до 80°C нефть подавалась в зону выхода плазмы из анода. Нагрев газа в электрической дуге происходил главным образом за счет энергии, выделяющейся в столбе дуги. Смешиваясь с плазмообразующим газом, реагирующая масса проходила через реакционную камеру и поступала в камеру закалки. После камеры закалки переработанный продукт попадал в камеру с большим объемом, где выравнивался по распределению состава и скорости и проходил через зону окончательного охлаждения. На выходе газообразный продукт переработки имел температуру 25-30°C. Конечный продукт имел в составе газовую и твердую фазы. Твердая фаза представляла собой мелкодисперсную сажу. Образование легких фракций углеводородов за счет теплового разбивания тяжелых фракций возможно при температурах ниже 1000 К. Поэтому в электродуговой плазме с температурой 3000 – 6000 К, в основном, образуются углеводороды с углеродной связью типа  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_4H_4$ , а также молекулярный водород и атомарный углерод.

### ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В данной работе проведен расчетный технико-экономический анализ работы высокотемпературного плазменного конвертера (ВТПК). Устройство и принцип действия конвертера были подробно описаны авторами [7, 8].

Комплекс ВТПК позволяет перерабатывать широкий круг различных отходов и их смесей: твердые бытовые отходы; нефтесодержащие отходы; отработанные нефтепродукты, смешанные с коксохимическими и промотходами; отходы полимерных материалов; автомобильные покрышки; осадок автомоек; илы сточных вод; медицинские отходы и др.

Преимуществом данной технологической схемы перед обычной технологической схемой сжигания отходов на мусороперерабатывающем заводе является извлечение  $CO_2$  из пирогаза и повторное его использование в качестве плазмообразующего газа в работе ВТПК. Кроме того, температурный

режим и конструктивные особенности комплекса ВТПК исключают возможность образования дибензодиоксинов и дибензофуранов в ходе процесса.

Для анализа выбран наиболее простой вариант работы комплекса ВТПК, который предусматривает получение в качестве товарной продукции только электроэнергии, тепловой энергии (пар, горячая вода) и базальтоподобного шлака (без получения водорода и углеводородов с использованием синтеза Фишера-Тропша).

Принципиальная схема этого варианта комплекса ВТПК показана на рис. 1. Подробное описание технологических схем работы комплексов ВТПК, аналогичных приведенной на рис. 1, приведено в [7]. Количество единиц основного оборудования, используемого в этом варианте (рис. 1) работы комплекса ВТПК, приведено в табл. 2.

**Таблица 2.** Основное оборудование, используемое в работе комплекса ВТПК

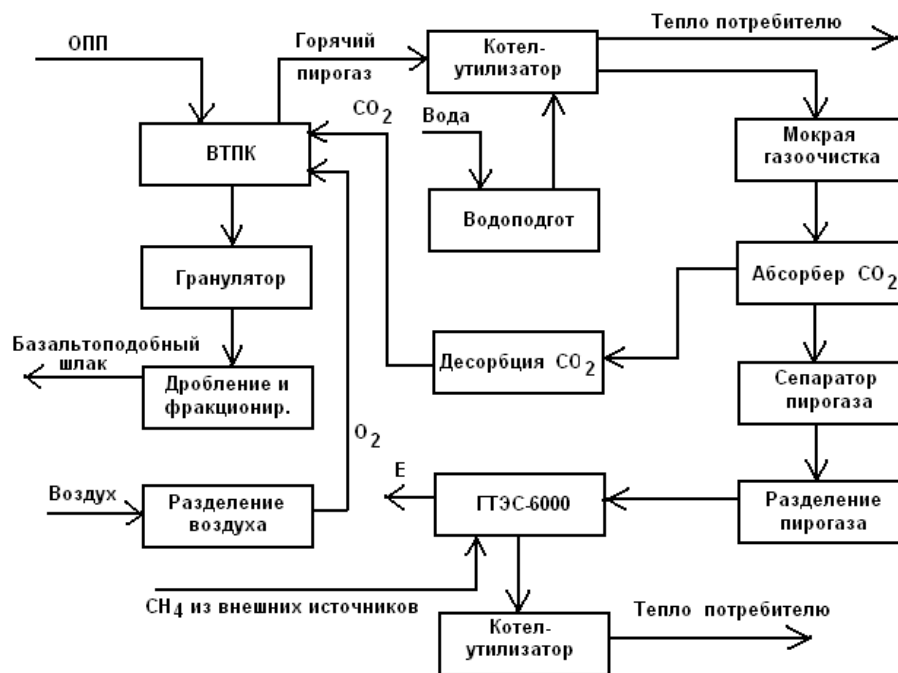
Наименование основного оборудования	Число единиц оборудования
Узел приемки и подготовки твердых отходов	3
Высокотемпературный плазменный конвертер ВТПК-12,5*	2
Водогрейный котел-утилизатор КУП-2000	2
Гранулятор шлака	1
Блок газоочистки	1
Блок выделения углекислого газа	1
Газотурбинная электростанция «Урал-6000»	2
Водогрейный котел-утилизатор УГ-55	2

\*В комплексе используются два ВТПК производительностью 12500 т/год по отходам. Каждый ВТПК имеет 4 шт. электродуговых плазмотронов ЭДП-600 и 1 шт. ЭДП-200М.

Анализ технико-экономических показателей проводили для постоянной годовой производительности комплекса ВТПК по отходам – 25000 тыс. т. (3500 кг/ч). Поток плазмообразующего газа (CO<sub>2</sub>) составлял 560 кг/ч.

Технология, основанная на использовании ВТПК, разработанная в НИУ «Курчатовский институт», была на практике реализована:

- 1) в Израиле (Хайфа): производительность по отходам 3200-3500 т/год, кап. Затраты составили около 40 млн. долл. США;
- 2) на стенде «Прометей» в НИЦ «Курчатовский институт»;
- 3) на установке по переработке РАО на Нововоронежской АЭС.



**Рис. 1.** Принципиальная схема анализируемого варианта комплекса ВТПК ОПП (ОПП – отходы производства и потребления).

На выход и состав пирогаза ВТПК, а, следовательно, и на калорийность пирогаза и энергетические показатели работы комплекса в целом основное влияние оказывают два фактора: состав перерабатываемых отходов и состав плазмообразующего газа.

Для расчетов использовали средние данные по элементному составу отходов, направляемых на плазменную переработку в ВТПК, которые приведены в таблице 3.

**Таблица 3.** Средний элементный состав ОПП

Тип ОПП	Элементный состав, % масс.							
	С	Н	О	N	S	H <sub>2</sub> O	Стекло	Зола
Бытовые отходы	34,84	3,38	28,45	0,15	0,14	14,87	15,45	2,71
Пищевые отходы	6,73	0,96	4,83	0,42	0,02	85,13	-	1,91
Нефтесодержащие отходы	59,10	7,89	0,70	0,21	2,49	19,74	-	9,86
Смешанные промышленные отходы	34,52	5,40	38,21	0,13	0,20	16,18	5,15	0,21
Отходы полимерных материалов	52,10	7,89	28,70	0,21	0,49	8,74	-	3,86
Автомобильные покрышки	74,60	12,40	-	-	1,00	-	-	12,00
Сточные воды	5,63	0,95	2,08	0,49	0,01	90,25	-	0,59
Илы сточных вод	46,08	7,78	17,03	4,00	0,09	20,20	-	4,80
Медицинские отходы	29,43	4,20	29,43	0,13	0,20	16,18	20,22	0,21

В качестве плазмообразующего (рабочего) газа может быть использован: диоксид углерода, кислород, воздух или их смеси. Технология предусматривала

возможность дополнительного ввода газа (кислорода, воздуха, диоксида углерода или их смесей) в зону пиролиза ВТПК. В настоящей работе при проведении технико-экономических расчетов в качестве рабочего газа использован диоксид углерода. Для анализа схемы был разработан алгоритм и программа расчета основных технико-экономических показателей процесса.

При проведении расчетов предполагали, что газовая смесь находится в термодинамическом равновесии.

Расчет равновесного состава смеси проводили следующим образом:

1. Задавали элементный состав смеси (мол.%) в суммарном потоке вещества на входе на стадию ВТПК.
2. На основе табличных данных рассчитывали значения энтальпии образования ( $\Delta_f H_i$ ) и энтропии ( $S_i$ )  $i$ -го компонентов пирогаза при температуре  $T$  по формулам:

$$\Delta_f H = a*T + b*T^2/2 + c*T^3/3 + d*T^4/4 - e/T + f,$$

$$S = a*\ln(T) + b*T + c*T^2/2 + d*T^3/3 - e/(2*T^2) + g,$$

где  $a, b, c, d, e, f, g$ , – табулированные коэффициенты.

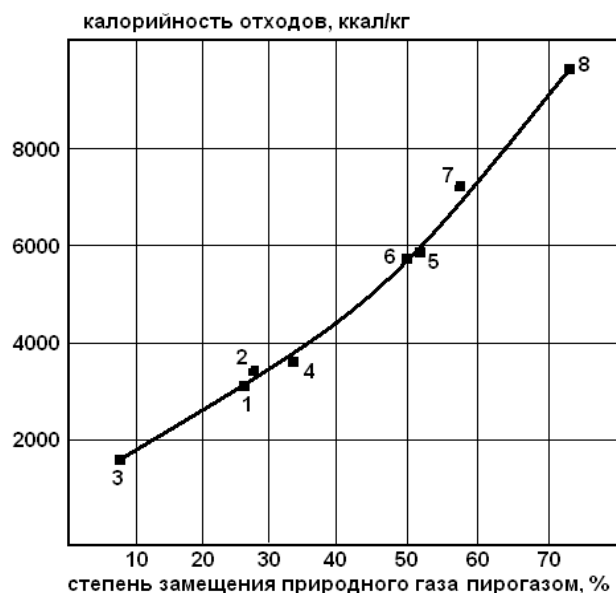
3. При заданной температуре проводили поиск минимума энергии Гиббса системы  $G(x_i)$ :

$$G(x_i) = \sum_i \mu_i x_i = \sum_i ((\Delta_f H_i - TS_i) + RT \ln x_i) x_i,$$

где  $x_i$  – мольное или объемное содержание  $i$ -го компонента в газовой фазе,  $\mu_i$  – химический потенциал  $i$ -го компонента при температуре  $T$ . На значения  $x_i$  в процессе поиска минимума функции  $G(x_i)$  накладывали ограничения, необходимые для выполнения условий материального баланса по каждому из элементов.

При плазменной переработке нефтесодержащих отходов количество вырабатываемого на ВТПК теплоносителя составляло 25,44 Гкал/час, а калорийность этих отходов (а, следовательно, и степень замещения природного газа пирогазом) была одной из наиболее высоких из исследуемых видов отходов – рис. 2. Экономическими показателями при анализе работы ВТПК являлись:

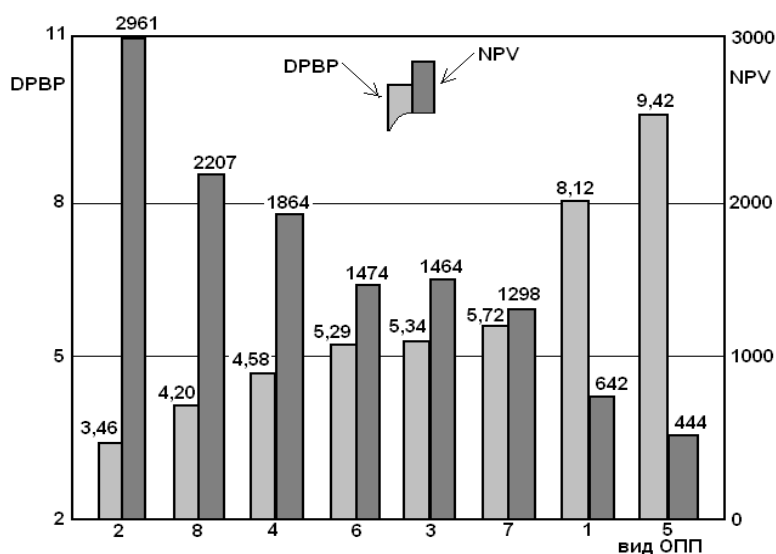
- 1) суммарная выручка от реализации продукции комплекса (базальтоподобного шлака, электроэнергии, теплоносителя) и выручка от переработки отходов;
- 2) чистая приведенная стоимость (NPV);
- 3) внутренняя норма рентабельности (IRR);
- 4) дисконтируемый срок окупаемости (DPBP).



**Рис. 2.** Зависимость степени замещения природного газа пирогазом от калорийности отходов. Типы ОПП: 1 - ТБО, 2 - медицинские отходы, 3 - осадок автомоек, 4 - отработанные нефтепродукты в смеси с коксохимическими и промышленными отходами, 5 - илы сточных вод, 6 - отходы полимеров, 7 - нефтесодержащие отходы, 8 - автомобильные покрышки.

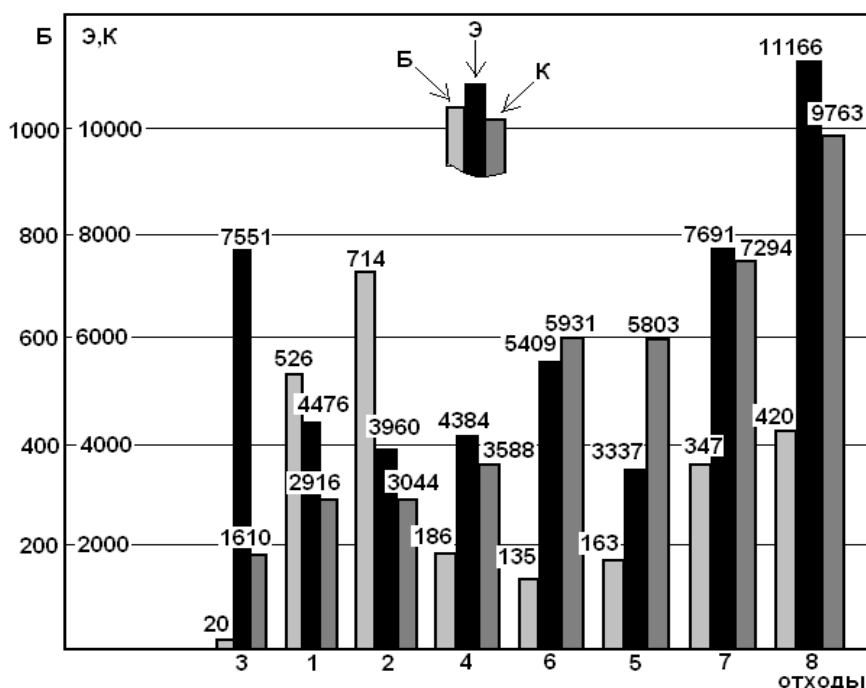
Из перечисленных показателей основным, на наш взгляд, является дисконтируемый срок окупаемости. Именно этот показатель показывает целесообразность реализации проекта комплекса ВТПК в рамках принятой модели.

В случае переработки нефтесодержащих отходов показатель DPBP имеет значение 5,72 года, что меньше допустимой границы срока окупаемости, а чистая приведенная стоимость ВТПК (1295 млн. руб) является вполне приемлемой и имеет промежуточное значение между аналогичными показателями для других видов отходов (рис. 3).



**Рис. 3.** Дисконтируемый срок окупаемости (DPBP, лет) и чистая приведенная стоимость (NPV, млн. руб.) комплекса ВТПК при использовании различных ОПП (тип ОПП – в соответствии с рис. 2).





**Рис. 4.** Количество базальтоподобного шлака (Б, кг/ч), электроэнергии (Э, кВт) и калорийность ОПП (К, ккал/кг) при переработке на ВТПК разных типов ОПП (тип ОПП указан в соответствии с рис. 2).

На рис. 4 приведены данные о количестве образующегося на ВТПК базальтоподобного шлака, выработки электроэнергии и калорийности отходов при переработке различных типов отходов.

Основные экономические показатели работы комплекса ВТПК при использовании различных типов ОПП приведены в табл. 4. Как видно из приведенных данных, все основные экономические параметры процесса: чистая приведенная стоимость (NPV), внутренняя норма рентабельности (IRR), и суммарная выручка от реализации продукции, тесно связаны с другим экономическим параметром – дисконтируемым сроком окупаемости комплекса ВТПК (DPBP) – рис. 5 и 6. Поэтому в первом приближении, задача оптимизации работы комплекса ВТПК должна сводиться к минимизации величины DPBP.

**Таблица 4.** Основные экономические показатели работы комплекса ВТПК при использовании различных типов ОПП

Показатель	Тип ОПП*							
	1	2	3	4	7	5	8	6
Суммарная выручка от реализации продукции ВТПК, млн. руб.	681	1204	869	957	832	636	1040	870
Чистая приведенная стоимость – NPV, млн. руб	642	2961	1464	1864	1298	444	2207	1474
Внутренняя норма рентабельности – IRR, %	22,5	51,3	32,1	37,3	30,2	20,1	40,7	32,5
Дисконтируемый срок окупаемости, DPBP, лет	8,12	3,46	5,34	4,58	5,72	9,42	4,20	5,29

\*Типы ОПП указаны в соответствии с рис. 2.



**Рис. 5.** Взаимосвязь между дисконтируемым сроком окупаемости (DPBP) комплекса ВТПК и внутренней нормой рентабельности (IRR). Цифрами указаны виды ОПП в соответствии с рис. 2.

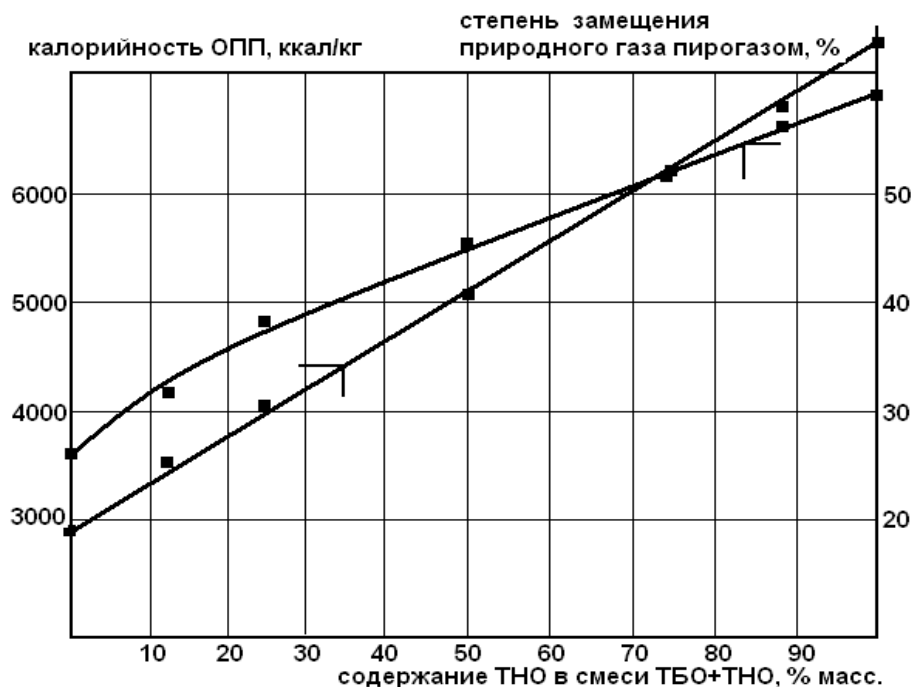


**Рис. 6.** Взаимосвязь между суммарной годовой выручкой от реализации продукции ВТПК и дисконтируемым сроком окупаемости (DPBP). Цифрами указаны виды ОПП в соответствии с рис. 2.

При переработке нефтесодержащих отходов (НСО) в смеси с твердыми бытовыми отходами (ТБО) – НСО + ТБО, технико-экономические показатели изменяются по сравнению с показателями для переработки только нефтесодержащих отходов.

Так, калорийность ОПП и степень замещения природного газа пирогазом возрастают с увеличением содержания НСО в смеси ТБО + НСО (рис. 7).

Количество вырабатываемого в комплексе ВТПК теплоносителя (пар, горячая вода) практически не зависит от содержания НСО в смеси ТБО + НСО. Среднее количество вырабатываемого в комплексе ВТПК теплоносителя при использовании в качестве ОПП смеси ТБО + НСО равно 25,15 Гкал/ч.

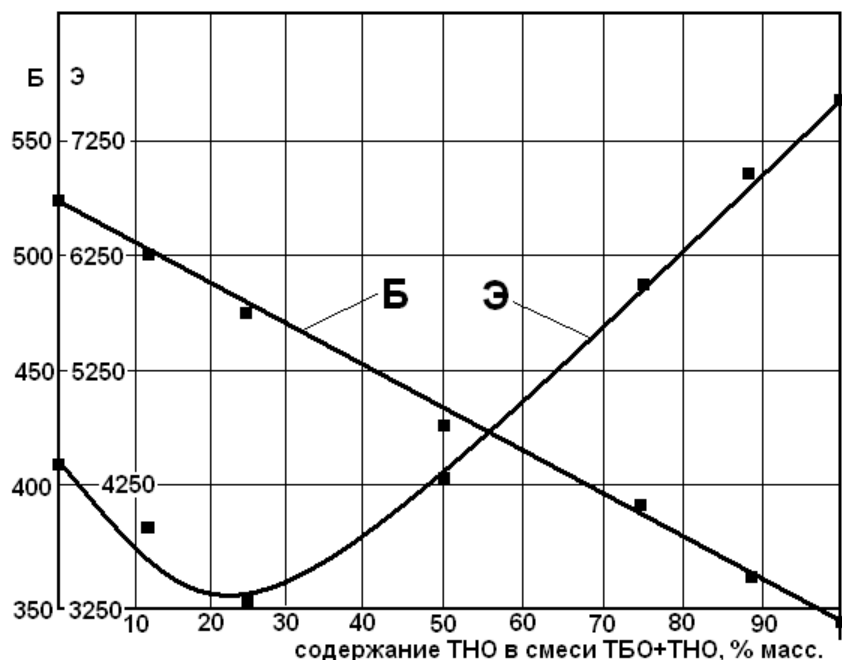


**Рис. 7.** Зависимость калорийности ОПП и степени замещения природного газа пирогазом от содержания НСО в смеси ТБО + НСО.

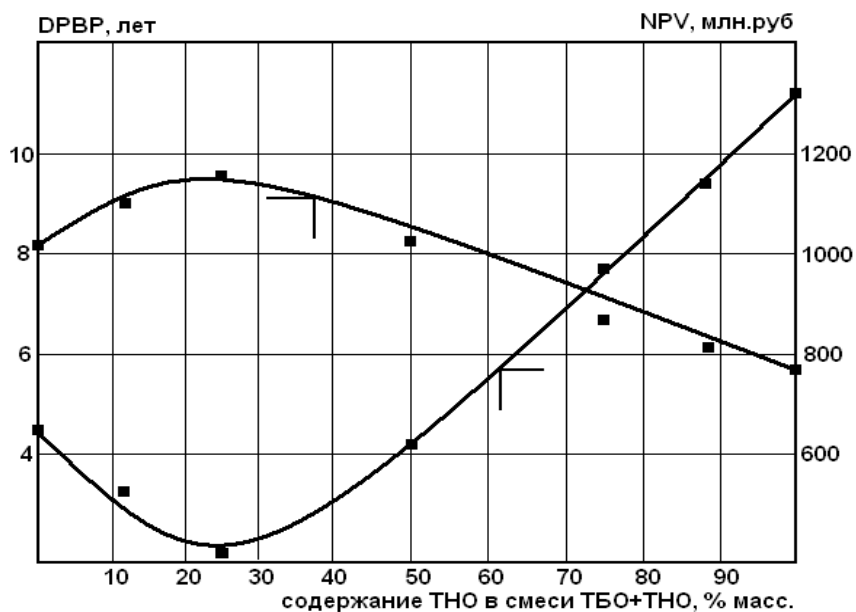
Зависимость объема производства базальтоподобного шлака от содержания НСО носит линейный характер – с увеличением содержания НСО в смеси ТБО + НСО объем производства базальтоподобного шлака уменьшается (рис. 8). Зависимость выработки электроэнергии от содержания НСО носит выраженный экстремальный характер – имеется такое соотношение НСО : ТБО, которое соответствует минимуму вырабатываемой электроэнергии (рис. 8).

Значения величин DPBP и NPV в зависимости от содержания НСО в смеси ТБО + НСО приведено на рис. 9. Эти зависимости носят выраженный экстремальный характер, что указывает на существование оптимального состава ОПП, обеспечивающего наилучшие экономические показатели функционирования комплекса. Аналогичные экстремальные кривые наблюдаются в случае зависимостей внутренней нормы рентабельности (IRR, %) и суммарной годовой выручки от реализации продукции от содержания НСО в смеси ТБО + НСО (рис. 10).

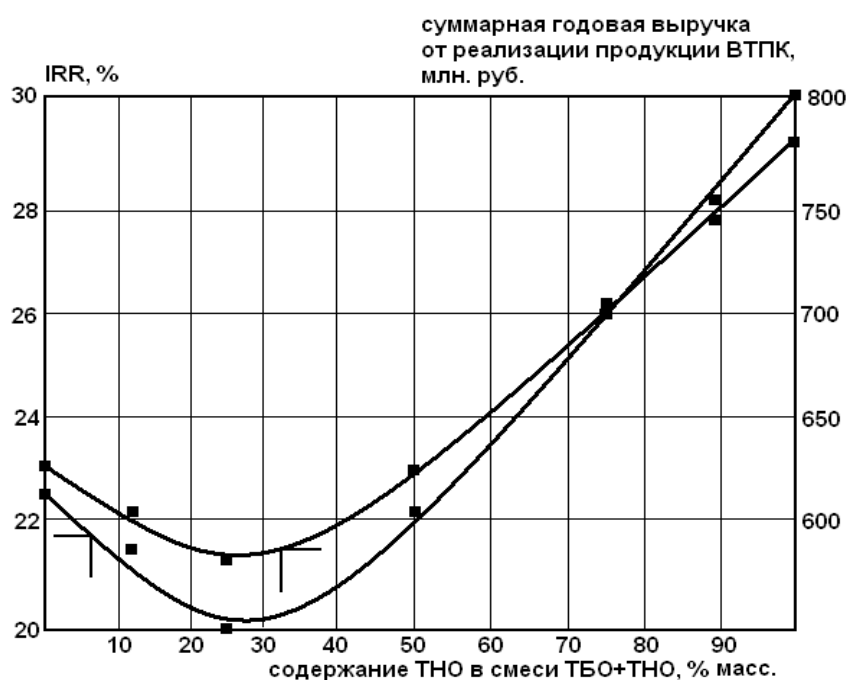
Основные экономические показатели работы комплекса ВТПК при использовании в качестве ОПП смеси ТБО + НСО приведены в табл. 5.



**Рис. 8.** Количество базальтоподобного шлака (Б, кг/час) и выработка электроэнергии (Э, кВт) в зависимости от содержания НСО в смеси ТБО + НСО.



**Рис. 9.** Зависимость дисконтируемого срока окупаемости (DPBP) и чистой приведенной стоимости (NPV) функционирования комплекса ВТПК от содержания НСО в смеси ТБО + НСО.



**Рис. 10.** Зависимость внутренней нормы рентабельности (IRR) и суммарной годовой выручки от реализации продукции ВТПК от содержания НСО в смеси ТБО + НСО.

**Таблица 5.** Основные экономические показатели работы комплекса ВТПК при использовании в качестве ОПП смеси ТБО + НСО

Показатель	Содержание НСО в смеси ТБО + НСО, % масс.						
	0	12	25	50	75	88	100
Суммарная выручка от реализации продукции ВТПК, млн. руб.	681	656	629	674	755	797	832
Чистая приведенная стоимость, NPV, млн. руб.	642	532	414	613	965	1146	1298
Внутренняя норма рентабельности, IRR, %	22,5	21,2	19,8	22,2	26,3	28,4	30,2
Дисконтируемый срок окупаемости, DPBP, лет	8,12	8,79	9,66	8,29	6,70	6,12	5,72

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные в работе расчеты технико-экономических показателей работы высокотемпературного плазменного конвертера переработки нефтесодержащих отходов позволяют сделать вывод о перспективности использования плазменных технологий при решении задач ликвидации нефтесодержащих отходов.

Следует отметить, что при использовании данной технологии можно проводить ликвидацию отходов различного типа в широком диапазоне состава – от твердых бытовых отходов до отходов с различным содержанием нефтепродуктов и до полностью нефтесодержащих отходов. При этом, как показывают полученные данные, срок окупаемости разработанной технологии

в выбранных условиях в случае ликвидации нефтесодержащих отходов имеет приемлемое значение, ниже допустимой границы его значений (5,72 года) при достаточно высоких значениях рентабельности и выручки. Рассмотренный способ ликвидации отходов достаточно эффективен и практически полностью экологически безопасен. При этом проблема высоких эксплуатационных затрат при реализации технологии плазменной переработки отходов может быть решена с помощью комплексного подхода, объединяющего технологии переработки отходов с технологиями использования продуктов этой переработки и рациональным использованием получаемых в технологическом процессе электроэнергии и тепла.

Список литературы:

1. Кумпаненко И.В., Роцин А.В., Берлин А.А., Мясоедов Б.Ф. // Химическая безопасность. 2017. Т. 1, № 1, с. 10.
2. Артемов А.В. // Нефть. Газ. Промышленность. 2004. № 4. С. 37.
3. Артемов А.В. // Нефть. Газ. Промышленность. 2004. № 5. С. 47.
4. Урюпина О.А., Шадрина Е.И., Начвина А.А. Проблемы накопления и утилизации нефтесодержащих отходов. XI Межд. научно-практ. конф. «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах». 2015. <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/BGD/2015/bgd2015/pages/Articles/3/20.pdf> (дата обращения 16.10.2017).
5. Tanobe V.O.A., Sydenstricker T.H.D., Amico S.C., Vargas J.V.C., Zawadzki S.F. // J. Appl. Polymer Sci. 2008. V. 111. No. 4. P. 1842.
6. Patent 5200083 US, 1993.
7. Воцилин С.А., Артемов А.В., Переславцев А.В., Кулыгин В.М. // Твердые бытовые отходы. 2017. № 8. С. 28. <http://www.solidwaste.ru/publ/view/1116.html> (дата обращения 16.10.2017).
8. Патент РФ по заявке 2009105470/007340 от 18.02.2009 МПК С10J 3/14. Способ получения углеводов из газообразных продуктов плазменной переработки твердых отходов (варианты).
9. Патент 2131906 РФ, 1997.
10. Патент 2129584 РФ, 1996.
11. Патент 2319730 РФ, 2006.

# PLASMA TECHNOLOGY FOR TREATMENT OF OIL-CONTAINING WASTE: PERFORMANCE ANALYSIS

*A. V. Artyomov\*, A. V. Pereslavytsev, S. A. Voschinin, and V. M. Kulygin*

National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia,  
\*e-mail: arsenyart@mail.ru

Received October 16, 2017

**Abstract** – The article presents the results of performance analysis of a technical procedure for treatment of oily waste in a high-temperature plasma converter. The calculations obtained demonstrate promising potential of using plasma technology for liquidation of oily waste along with acceptable values of payback period and profitability. The developed method of eliminating waste provides virtually no pollution of the atmosphere with toxic products such as furans and dioxins. In addition, instead of the hazardous ash residue obtained from conventional waste combustion, the end product of plasma waste processing technology is an ecologically safe basalt-like slag of inorganic origin, which can be used further, as well as the electric power and heat generated in the course of the process.

*Keywords:* processing of oily waste, plasma chemistry, performance analysis, power generation, basalt-like slag, capital cost repayment period, internal rate of return, net present value, pyrogas.