

# ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ИЛОВЫХ ОТХОДОВ



*А. В. Артёмов, А. В. Переславцев, С. А. Воишин, С. С. Тресвятский, С. В. Коробцев, Ю. А. Крутяков, А. А. Кудринский, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»*

В статье продемонстрированы выгоды и перспективы применения плазменных технологий для переработки иловых осадков и наглядно представлены результаты сравнительного технико-экономического анализа работы высокотемпературного плазменного конвертера (далее – ВТПК) при переработке иловых отходов в сравнении с другими видами отходов.

**П**лазменные технологии – одно из перспективных и наиболее экологически безопасных направлений переработки отходов производства и потребления (далее – ОПП) [1]. Эти технологии могут быть реализованы в ВТПК, устройство и принцип действия которого достаточно подробно описаны в [2].

Использование плазменных технологий широко известно для переработки и обезвреживания отходов различных видов

и классов опасности в диапазоне от I до V класса включительно. Эти широкие возможности плазменных технологий позволяют обращаться к ним для получения сорбентов из рисовой лузги и гречневой шелухи (сорбенты РС и ГС соответственно) [3]. Физико-химические характеристики РС и ГС близки к характеристикам таких распространенных сорбентов, как силикагель и активированный уголь, а в некоторых позициях и превосходят их (табл. 1).

Сорбенты РС и ГС рекомендованы для использования при производстве и переработке пищевых продуктов, а также в качестве вспомогательного компонента для очистки и фильтрации воды и воздуха. При использовании этих сорбентов для очистки водной поверхности от нефти степень очистки достигает 98,7 %.

Плазменные технологии, кроме их применения для обезвреживания путем уничтожения широкой гаммы ОПП, могут применяться и для уничтожения иловых осадков (кека) сточных вод, получаемых при очистке городских канализационных стоков и стоков ливневой канализации.

Переработка иловых осадков – одна из основных проблем промышленной экологии. Только в Московской области скопилось несколько миллионов тонн этих отходов [4]. Из общего количества иловых осадков используется в качестве удобрений, кормовых добавок и других продуктов не более 2 %, это связано с их токсичностью из-за высоко-

Таблица 1.

Сравнительная характеристика сорбентов

Показатель	Силикагель	Силикагель крупнопористый	Активированный уголь	Сорбент РС	Сорбент ГС
Плотность, г/см <sup>3</sup> : истинная	2,1–2,3	2,1–2,3	1,75–2,1	2,0–2,4	1,9–2,3
кажущаяся	1,3–1,4	0,75–0,85	0,5–1,0	1,1–1,5	0,9–1,4
насыпная	0,8	0,5	0,2–0,6	0,08–0,15	0,08–0,15
Объем пор, см <sup>3</sup> /г	0,28	0,9	–	0,78	0,74
Радиус пор, А	5–30	70–100	< 70	50–100	50–100
Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	450–500	270–350	600–1700	800–1000	750–950

Таблица 2.

Содержание металлов в сухом иле и существующие нормы (ПДК), (мг/кг)

Металл	Содержание в иле на станциях аэрации		ПДК в почвах
	Санкт-Петербург	Москва	
Pb	550	1000	32
Cu	700	1500	3
Ni	250	400	4
Zn	3000	3000–5000	23
Hg	0,5	15	2,1

го содержания тяжелых металлов – меди, цинка, никеля, ртути, свинца (табл. 2), – и дальнейшее их применение жестко регулируется соответствующими нормативами [5, 6].

Основной метод переработки иловых осадков – сжигание с получением золы, которая складывается на специальных площадках, и лишь небольшая ее часть используется в качестве наполнителей бетонов [4]. Процессы сжигания связаны с большими затратами на складирование, газо- и пылеочистку – свыше 25 долл. США на 1 т сухого осадка. В отличие от сжигания, использование плазменных технологий позволяет перерабатывать иловый осадок в два полезных продукта: низкокалорийный синтез-газ, пригодный для выработки электроэнергии и тепловой энергии (пар, горячая вода), и базальтоподобный стекло-

видный шлак, используемый для получения неорганических (базальтовых) волокон [7].

В настоящей работе описаны результаты сравнительного технико-экономического анализа работы комплекса ВТПК при переработке иловых отходов в сравнении с другими видами отходов. Для анализа был выбран наиболее простой вариант работы, который предусматривает получение в качестве товарной продукции только электроэнергию, тепловую энергию (пар, горячая вода) и базальтоподобный шлак (без получения водорода и/или углеводородов с использованием синтеза Фишера–Тропша). Принципиальная схема этого варианта комплекса ВТПК показана на рис. 1.

Преимуществом данной технологии перед традиционным сжиганием отходов является практически

полное извлечение CO<sub>2</sub> из пирогаза и повторное его использование в качестве плазмообразующего газа. Кроме того, температурный режим и конструктивные особенности комплекса ВТПК практически исключают возможность образования дибензодиоксинов и дибензофуранов в ходе процесса.

Комплекс ВТПК позволяет перерабатывать различные ОПП и их смеси: иловые осадки; ТКО; тяжелые нефтяные остатки; смешанные промышленные отходы; отходы полимерных материалов; автомобильные покрывки; осадок автомоек; медицинские отходы и др.

Сравнительный технико-экономический анализ проводили для постоянной годовой производительности комплекса ВТПК по отходам – 25 млн т (3357,5 кг/ч с учетом реального времени эксплуатации – 7466 часов в год\*). Поток плазмообразующего газа (CO<sub>2</sub>) составлял 1588 кг/ч.

На выход и состав пирогаза ВТПК ОПП, 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. Усредненные данные по элементному составу иловых осадков и других ОПП, направляемых на плазменную переработку в ВТПК, приведены в табл. 3.

В качестве плазмообразующего (рабочего) газа могут быть использованы диоксид углерода, кислород, воздух или их смеси. Технология предусматривает возможность дополнительного ввода газа (кислорода, воздуха, диоксида углерода или их смесей) в зону пиролиза ВТПК. В настоящей работе в качестве рабочего газа использован диоксид углерода, для дополнительного дутья в зону пиролиза ВТПК использовали кислород (рис. 1), который получали из воздуха. Для анализа схемы были разработаны алгоритм и программа

\* Реальное время эксплуатации определялось исходя из структуры технологического уклада комплекса, его эксплуатации 24 ч/сут по 4-сменному графику и необходимости обязательной ежегодной технической профилактики оборудования комплекса.

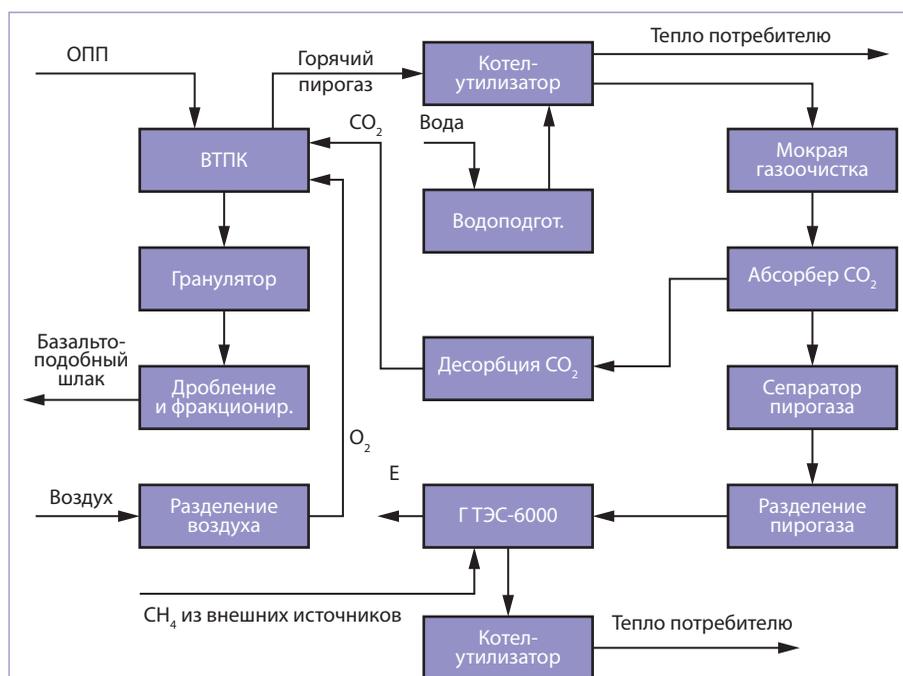


Рис. 1. Принципиальная схема варианта комплекса ВТПК ОПП

Таблица 3.

Средний элементный состав иловых осадков и других ОПП

№	Вид отходов производства и потребления	Элементный состав, % масс.							
		С	Н	О	N	S	H <sub>2</sub> O	Стекло	Зола
1	Коммунальные отходы	34,84	3,38	28,45	0,15	0,14	14,87	15,45	2,71
2	Тяжелые нефтяные остатки	59,10	7,89	0,70	0,21	2,49	19,74	–	9,86
3	Смешанные промышленные отходы	34,52	5,40	38,21	0,13	0,20	16,18	5,15	0,21
4	Отходы полимерных материалов	52,10	7,89	28,70	0,21	0,49	8,74	–	3,86
5	Автомобильные покрышки	74,60	12,40	–	–	1,00	–	–	12,00
6	Осадок автомоек	5,63	0,95	2,08	0,49	0,01	90,25	–	0,59
7	Иловые осадки	46,08	7,78	17,03	4,00	0,09	20,20	–	4,80
8	Медицинские отходы	29,43	4,20	29,43	0,13	0,20	16,18	20,22	0,21

расчета основных технико-экономических показателей процесса [8].

Основные исходные данные для расчета:

- морфологический и элементный состав перерабатываемых отходов;
- производительность плазменного реактора по отходам и общее количество реакторов в комплексе ВТПК;
- состав и количество плазмообразующего газа;
- состав и количество дополнительного дутья в плазменный реактор;

- количество плазмотронов в плазменной камере одного плазменного реактора;

- параметры энергоблока (количество котлов-утилизаторов для утилизации тепла пирогаза, отводимого из ВТПК; количество ГТЭС и их моделей; количество и мощность паровых турбин и др.);

- схема переработки отходов с использованием установок: энергоблока и/или производства водорода и/или производства метанола и/или производства дизтоплива (в данной статье был использован только энергоблок);

- горизонт планирования – до 20 лет и др.

Основные технологические результаты расчета:

- степень замещения природного газа пирогазом;

- количество получаемой конечной продукции: синтетического дизельного топлива, водорода, метанола, базальтоподобного шлака, легкого бензина, парафина, электроэнергии, теплоносителя (150 °С);

- калорийность отходов;

- расчеты модельного ряда комплексов ВТПК по переработке отходов производительностью по отходам 25–300 тыс. т/год;

- состав и количество пирогаза по стадиям переработки.

Основные экономические результаты расчета:

- объем инвестиционных вложений;

- объем реализации конечной продукции, включая выручку от утилизации отходов;

- показатели эффективности полных инвестиционных затрат, вклю-

чая чистую приведенную стоимость (NPV), внутреннюю норму рентабельности (IRR), дисконтированный срок окупаемости (DPBP);

- валовая и чистая прибыль.

При плазменной переработке иловых отходов количество дополнительного кислорода (Q), вводимого в зону пиролиза ВТПК для получения качественного базальтоподобного шлака, равно примерно 240 кг/ч. Для переработки таких малокалорийных отходов, как твердые коммунальные отходы (ТКО), медицинские отходы, осадок автомоек и смешанные промышленные отходы, эта величина почти в два раза меньше – примерно 106 кг/ч. Величина Q колеблется при переработке высококалорийных отходов и составляет для отходов полимеров примерно 203 кг/ч, для тяжелых нефтяных остатков – 336 кг/ч, для автомобильных покрышек – 453 кг/ч. Причем эти показатели характерны для постоянной мощности плазмотронов 600 кВт.

Теплотехническая характеристика отходов – калорийность – определяет один из основных экологических показателей процесса – степень замещения природного газа пирогазом, получаемым в результате переработки отходов. Для плазменной переработки иловых осадков степень замещения достаточно высока и составляет около 51 %. Для всех исследованных отходов, в том числе и иловых, степень замещения природного газа пирогазом симбатно связана с калорийностью отходов (рис. 2).

На количество вырабатываемого теплоносителя (пар, горячая вода)

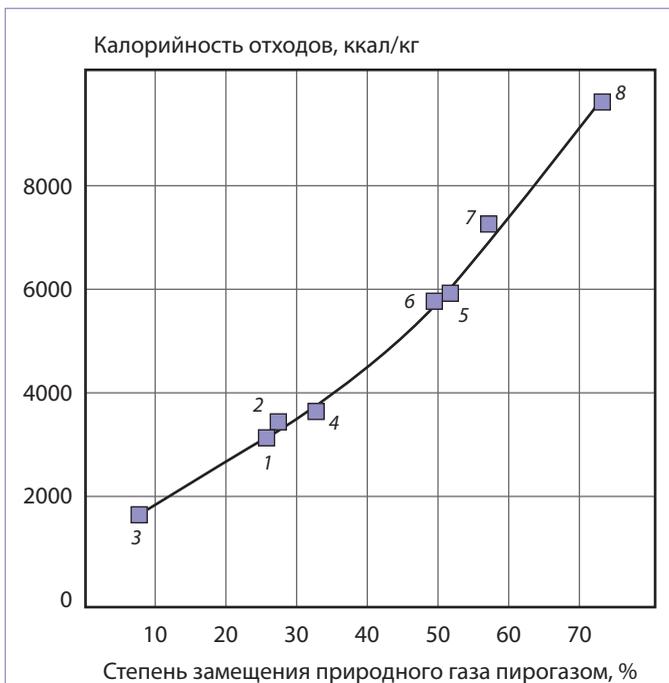


Рис. 2. Зависимость степени замещения природного газа пирогазом от калорийности отходов: 1 – ТКО, 2 – медицинские отходы, 3 – осадок автомоек, 4 – смешанные промышленные отходы, 5 – иловые осадки, 6 – отходы полимеров, 7 – тяжелые нефтяные остатки, 8 – автомобильные покрышки

Таблица 4.

**Основные экономические показатели работы комплекса ВТПК для различных вариантов компонентного состава ОПП**

Экономический показатель	Варианты компонентного состава ОПП		
	1	2	3
Суммарная выручка от реализации продукции ВТПК, млн руб.	1 334	1 683	1 451
Суммарная выручка от реализации услуг ВТПК, млн руб.	94	442	244
Чистая приведенная стоимость – NPV, млн руб.	– 710	885	269
Внутренняя норма рентабельности – IRR, %	9	15	13
Дисконтированный срок окупаемости – DPBP, кол-во лет	Более 20	14,4	17,7

тип перерабатываемых отходов не оказывает существенного влияния. Среднее количество вырабатываемого на ВТПК теплоносителя – примерно 50 Гкал/ч.

При плазменной переработке иловых отходов в комплексе ВТПК количество получаемого базальтоподобного шлака невелико и составляет 155 кг/ч (меньше шлака получают только при переработке осадка автомоек – 20 кг/ч, а также отходов полимеров – 135 кг/ч). Более высокие показатели по этому параметру имеют смешанные промышленные отходы – 186 кг/ч, тяжелые нефтяные остатки – 347 кг/ч, автомобильные покрышки – 420 кг/ч. Наибольшее количество базальтоподобного шлака получают при переработке в ВТПК ТКО – 326 кг/ч и медицинских отходов – 663 кг/ч.

В зависимости от вида перерабатываемых отходов комплекс ВТПК имеет различные дисконтированные сроки окупаемости (DPBP). Так же ведут себя и чистая приведенная стоимость (NPV), и внутренняя норма рентабельности (IRR), которые зависят от суммарной годовой выручки от реализации продукции ВТПК и оказания платных услуг по обезвреживанию различных типов и комбинаций типов отходов в общем потоке ОПП.

Основные экономические показатели для различных вариантов компонентного состава ОПП приведены в табл. 4. Как видно из полученных данных, все основные экономические параметры процесса – NPV, IRR и суммарная выручка от реализации продукции – тесно связаны с DPBP комплекса ВТПК. Поэтому зада-

ча оптимизации работы комплекса ВТПК для различных вариантов компонентного состава ОПП в основном сводится к минимизации величины DPBP.

Вариативность компонентного состава отходов, поступающих

на обезвреживание в ВТПК, весьма высока. Для получения более или менее близких к реальному положению вещей экономических параметров выберем три варианта компонентного состава отходов, поступающих в ВТПК (табл. 5).

Таблица 5.

**Варианты компонентного состава отходов, поступающих в ВТПК**

	Виды отходов	%	т/год
Вариант I	Твердые коммунальные отходы (ТКО) [плотность 0,182 т/м <sup>3</sup> ]	70,00 %	17 500,00
	Тяжелые нефтяные остатки (ТНО)	5,00 %	1 250,00
	Отходы полимерных материалов (ОПМ)	5,00 %	1 250,00
	Автомобильные покрышки (АП)	7,00 %	1 750,00
	Отходы деревообработки (ОД)	6,00 %	1 500,00
	Илы (кек) сточных вод (или помет животных, или биомасса) (БО)	2,00 %	500,00
	Медицинские отходы (МО)	5,00 %	1 250,00
	Суммарный поток отходов в технологическом балансе	100,00 %	25 000,00
Вариант II	Твердые коммунальные отходы (ТКО) [плотность 0,182 т/м <sup>3</sup> ]	25,00 %	6 250,00
	Тяжелые нефтяные остатки (ТНО)	5,00 %	1 250,00
	Отходы полимерных материалов (ОПМ)	5,00 %	1 250,00
	Автомобильные покрышки (АП)	7,00 %	1 750,00
	Отходы деревообработки (ОД)	6,00 %	1 500,00
	Илы (кек) сточных вод (или помет животных, или биомасса) (БО)	2,00 %	500,00
	Медицинские отходы (МО)	50,00 %	12 500,00
	Суммарный поток отходов в технологическом балансе	100,00 %	25 000,00
Вариант III	Твердые коммунальные отходы (ТКО) [плотность 0,182 т/м <sup>3</sup> ]	30,00 %	7 500,00
	Тяжелые нефтяные остатки (ТНО)	20,00 %	5 000,00
	Отходы полимерных материалов (ОПМ)	7,00 %	1 750,00
	Автомобильные покрышки (АП)	20,00 %	5 000,00
	Отходы деревообработки (ОД)	1,00 %	250,00
	Илы (кек) сточных вод (или помет животных, или биомасса) (БО)	2,00 %	500,00
	Медицинские отходы (МО)	20,00 %	5 000,00
	Суммарный поток отходов в технологическом балансе	100,00 %	25 000,00

Таблица 6.

Стоимость оказания услуг по обезвреживанию компонентов ОПП

Стоимость обезвреживания/уничтожения отходов, руб./т (с НДС)		Эквивалент по курсу ЦБ РФ на 12.08.2019	
		евро	доллар США
Твердые коммунальные отходы (ТКО) [плотность 0,182 т/м <sup>3</sup> ]	1 200,00	16,43	18,39
Тяжелые нефтяные остатки (ТНО)	4 500,00	61,63	68,96
Отходы полимерных материалов (ОПМ)	3 500,00	47,93	53,64
Автомобильные покрышки (АП)	5 000,00	68,47	76,62
Отходы деревообработки (ОД)	800,00	10,96	12,26
Илы (кек) сточных вод (или помет животных, или биомасса) (БО)	1 200,00	16,43	18,39
Медицинские отходы (МО)	25 000,00	342,37	383,12

Таблица 7.

Стоимость реализации продукции комплексов ВТПК

Стоимость конечной продукции Комплекса, (с НДС)		Эквивалент по курсу ЦБ РФ на 12.08.2019	
		евро	доллар США
Базальтоподобный шлак, руб/т	500,00	6,85	7,66
Электроэнергия, руб/кВт·ч	2,50	0,03	0,04
Теплоноситель (вода при t = 150 °С), руб/Гкал	1 500,00	20,54	22,99

Суммарный поток отходов в технологическом балансе для всех вариантов прием равным 25 тыс. т/год.

Прогноз вариантов экономической эффективности выполнен для единых цен на оказание услуг по обезвреживанию компонентов ОПП (табл. 6) и единых цен реализации продукции комплексов ВТПК (табл. 7).

Проделанный краткий анализ показывает, что финансово-экономическая составляющая существенно зависит от организации сбытовой политики комплекса ВТПК и предлагаемой к реализации номенклатуры продукции, которую можно увеличить, расширив возможности комплекса, структуры компонентного состава отходов, поступающих на обезвреживание, и которая напрямую связана с насущными потребностями в обеспечении экологической безопасности региона расположения комплекса ВТПК. ♻️

Работа выполнена в рамках внутренней субсидии НИЦ «Курчатовский институт» № 1569.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Воицинин С. А., Артёмов А. В., Переславцев А. В., Кулыгин В. М. Новые технологии высокотемпературной пиролизической переработки отходов // *Твердые бытовые отходы*. – 2017. – № 8. – С. 28–32.

2. Пат. № 2009105470/007340 Российская Федерация, МПК C10J 3/14. Способ получения углеводородов из газообразных продуктов плазменной переработки твердых отходов (варианты): заявл. 18.02.2009 / С. А. Воицинин, Ю. А. Крутяков, А. В. Переславцев. – Текст : непосредственный.

3. Исрафилов И. Х., Абдуллин И. Ш., Гафаров И. Г., Сентдверды Г. Дуговые плазматроны для получения сорбентов // *Экология и промышленность России*. – 2002. – № 5. – С. 15–19.

4. Медведев А. С., Стрижко В. С., Рудань О. В. Обезвреживание осадков городских станций аэрации // *Экология и промышленность России*. – 2002. – № 5. – С. 31–34.

5. Охрана почвы. Санитарные нормы предельно допустимого содержания вредных веществ // *Сборник нормативных материалов по охране окружающей среды*. – Ч. 2. – Минск, 1990.

6. Предельно допустимые концентрации химических веществ в почве (ПДК): № 3210-85 от 01.02.85 / МЗ СССР. – М., 1985.

7. Артёмов А. В., Воицинин С. А., Переславцев А. В., Кулыгин В. М. Перспективные аспекты плазменной переработки стеклосодержащих отходов // *Твердые бытовые отходы*. – 2018. – № 3. – С. 39–43.

8. Артёмов А. В., Бульба В. А., Воицинин С. А., Крутяков Ю. А., Кудринский А. А., Острый И. И., Переславцев А. В. Продукты высокотемпературной плазменной конверсии твердых отходов производства и потребления. Сравнительная оценка качества продуктов плазменной технологии и традиционной технологии сжигания // *Российский химический журнал*. – 2010. – Т. 54. – № 6. – С. 19–25.