DOI 10.15593/2409-5125/2018.04.03 УДК 504.064.45

С.В. Полыгалов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ИХ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ

Представлены подходы к выполнению технико-экономической оценки технологий обработки твердых коммунальных отходов (ТКО) для их последующей энергетической утилизации. С использованием предложенного алгоритма выполнена технико-экономическая оценка 6 разных технологий обращения с ТКО с предварительной обработкой или без нее, в том числе захоронение ТКО, сортировка твердых коммунальных отходов с выделением вторичного сырья, сжигание, и четыре варианта термической утилизации с учетом использования разной предварительной обработки. Выполнены полевые и лабораторные исследования компонентного состава ТКО и их теплотехнических свойств (влажности и зольности), которые позволили спрогнозировать качественные и количественные характеристики выходящих потоков ТКО для всех рассматриваемых вариантов. На основе анализа материальных потоков рассчитана масса сжигаемых отходов и продуктов их утилизации для разных технологий. С учетом капитальных и операционных затрат, тарифов на захоронение и сжигание отходов, ставки платы за размещение отходов на объектах захоронения отходов, оценки дохода от реализации продуктов (вторичного сырья и твердого топлива) выполнена экономическая оценка рассматриваемых технологий, которая позволила определить экономически эффективную технологию обработки ТКО. Установлено, что даже при высоких затратах на подготовку получения твердого топлива из отходов можно достичь экономического эффекта.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, твердое топливо из отходов, влажность, теплота сгорания, капитальные затраты, операционные затраты.

Требования Федерального закона от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» направлены на улучшение состояния окружающей природной среды за счет решения ряда вопросов, таких как предотвращение выбросов парниковых газов, сокращение загрязняющих веществ, экономия первичной энергии, сохранение природных ресурсов, сокращение земель, создание новых рабочих мест, развитие чистых тех-

Полыгалов С.В. Технико-экономическая оценка технологий обработки твердых коммунальных отходов для их последующей энергетической утилизации // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. -2018. -№ 4. -C. 31–46. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.04.03

Polygalov S. Technical and economic assessment of municipal solid waste treatment technologies for subsequent energy recovery. PNRPU. Applied ecology. Urban development. 2018. No. 4. Pp. 31-46. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.04.03

нологий [1]. При этом ФЗ-89 устанавливает приоритетные направления, которые должны учитываться при выборе системы обращения с отходами, среди которых — применение технологий получения конечного продукта, доступного для использования в других технологических процессах в качестве исходного сырья или добавки к основному сырью. Таким образом, использование ресурсного потенциала отходов путем извлечения и использования вторичного сырья отвечает приоритетным направлениям развития системы обращения с отходами.

Термическая утилизация отходов является завершающим этапом комплексной системы обращения с отходами [2, 3] и является эффективным решением проблемы ТКО, так как позволяет уменьшить объем захораниваемых отходов на полигонах и свалках ТКО [4], а также получить тепловую и электрическую энергию. В Российской Федерации разработан приоритетный проект «Чистая страна» по снижению доли захоронения твердых коммунальных отходов и выработке электроэнергии, который предполагает строительство мусоросжигательных заводов в Московской области и г. Москве мощностью 280 МВт и одного мусоросжигательного завода и в Республике Татарстан мощностью 55 МВт (Распоряжение Правительства РФ от 28.02.2017 г. № 355-р «Перечень субъектов Российской Федерации, в которых предусматривается строительство (реконструкция, модернизация) генерирующих объектов, функционирующих на основе использования отходов производства и потребления»). На основании распоряжения Правительства РФ от 31.03.2018 г. № 567-р «О перечне субъектов Российской Федерации, в которых предусматривается строительство (реконструкция, модернизация) генерирующих объектов, функционирующих на основе использования отходов производства и потребления» предусматривается строительство генерирующих объектов, функционирующих на основе использования отходов производства и потребления в Краснодарском крае мощностью 55 МВт и в Ставропольском крае мощностью 55 МВт.

Однако при недостаточно эффективной организации процесса сжигание отходов может сопровождаться вредными выбросами в атмосферный воздух и образованием токсичной золы [5, 6]. Решением данной проблемы может стать предварительная обработка ТКО, в частности сортировка с целью удаления опасных материалов и повышения калорийности сжигаемых отходов. С учетом принципов рационального использования ресурсов процесс обработки ТКО должен осуществляется с максимальным извлечением вторичного сырья, энергетической фракции или твердого топлива из отходов и т.п.

В работе испанских ученых [7] с экономической и экологической точек зрения рассмотрены различные технологии обращения с ТКО, предусматривающие получение энергии. Экономическая эффективность рассчитывалась как разница между издержками и доходами, полученными от производства энергии и продажи побочных продуктов.

Для проведения экономической оценки разных сценариев управления ТКО в г. Иркутске в работе [8] предложено учитывать капитальные и эксплуатационные затраты, выручку от реализации вторичных материалов и стоимость утилизации отходов. Для определения возможности оптимизации системы управления отходами в зависимости от экономического благосостояния населения были определены значения платежей для жителей.

В данной статье предложен подход, учитывающий не только отклонение доходов и расходов на реализацию той или иной технологии, но и эколого-экономические показатели (в частности, экологические платежи). При этом рассматривается использование различных технологий обработки ТКО для их последующей энергетической утилизации. Альтернативные варианты сравниваются с традиционной системой обращения с отходами, т.е. с захоронением ТКО на объектах размещения отходов (ОРО).

Материалы и методы. Варианты обращения с отходами. На основании анализа системы обращения с отходами в Российской Федерации и за рубежом, а также практических данных, полученных в ходе полевых и лабораторных исследований [9], для сравнения предложены следующие варианты обращения с отходами:

- вариант 0: захоронение ТКО без дополнительных операций (В.0);
- вариант 1: прямое сжигание необработанных отходов (В.1). Сжигание осуществляется на мусоросжигательных заводах (МСЗ) с получением тепловой и электрической энергии. При данном методе обезвреживания все поступающие на МСЗ отходы сжигаются без предварительной подготовки или обработки;
- вариант 2: сжигание ТКО без отсева (В.2). Принято, что исходный поток ТКО направляется на технологическую линию обработки отходов с целью удаления отсева (мелкой фракции) для увеличения теплоты сгорания ТКО. Остатки сортировки направляются на МСЗ, а отсев на участок захоронения отходов;
- вариант 3: сжигание «хвостов» сортировки ТКО (В.3). В данном варианте основной задачей является выделение вторичного сырья на технологической линии сортировки ТКО с целью его реализации после предварительного отделения мелкой фракции, которая направляется на захоронение. «Хвосты» сортировки направляются на МСЗ для сжигания;

- вариант 4: получение энергетической фракции ТКО (В.4). В сравнении с предыдущим вариантом «хвосты» сортировки подвергаются дополнительной обработке (оптико-механической сортировке) с выделением горючих компонентов. Получаемая энергетическая фракция по основным своим характеристикам (теплота сгорания, содержание хлора и ртути) уже соответствует требованиями ГОСТ 33516–2015 на твердое топливо из отходов, однако не отвечает требованиям потребителей, в частности производителей цемента, по влажности и размеру частиц;
- вариант 5: получение твердого топлива из отходов (В.5). Данный вариант дополняет предыдущий вариант необходимыми технологиями подготовки твердого топлива из отходов с учетом требований потребителей, в частности цементных предприятий [10]. Для этих целей обычно используется дробление и сушка. Это позволяет максимально снизить влажность отходов, благодаря чему теплота сгорания отходов существенно повышается;
- вариант 6: выделение вторичного сырья (В.6). Метод обычно применяется для выделения из общего потока ТКО вторичного сырья определенного состава и качества для последующей утилизации. Оставшаяся часть ТКО после сортировки направляется на объекты захоронения отходов. Вариант рассмотрен для сравнительной оценки эффективности энергетической утилизации «хвостов» сортировки.

При оценке вариантов принято, что захоронение осуществляется на специализированных объектах, в которых предусмотрены специальные мероприятия и применение защитных средств для обеспечения безопасного захоронения отходов в окружающей среде. Мусоросжигательные заводы рассматриваются как современные инженерные сооружения, обеспечивающие:

- равномерный процесс горения, что исключает недожог;
- выдерживание дымовых газов в котле при температуре свыше 850 °C, что обеспечивает разрушение высокотоксичных соединений (например, диоксинов);
 - необходимую очистку дымовых газов;
 - извлечение черных и цветных металлов из зольного остатка [11].

Обработка отходов в рассматриваемых вариантах обращения с ТКО является последовательной (каждый следующий вариант — это предыдущий вариант обработки, дополненный следующим этапом), поэтому может быть представлена в виде общей технологической схемы (рис. 1).



Рис. 1. Технологическая схема подготовки и энергетической утилизации ТКО: В.0 – захоронение ТКО; В.1 – прямое сжигание необработанных ТКО; В.2 – сжигание ТКО без отсева; В.3 – сжигание «хвостов» сортировки ТКО; В.4 – получение энергетической фракции; В.5 – получение твердого топлива из отходов; В.6 – выделение вторичного сырья

Технологическая линия обработки ТКО и подготовки к дальнейшей энергетической утилизации включает следующие операции:

- грохочение (размер ячеек 50 мм), предназначенное для выделения отсева. Грохот является важным элементом в технологической схеме подготовки и утилизации ТКО, так как на основании установленной зависимости [12] влажность отсева (фракции с размером частиц до 50 мм) выше, чем у фракции ТКО с размером частиц от 50 мм. За счет отделения мелкой фракции можно увеличить теплоту сгорания целевого потока ТКО (крупной фракции);
- отбор вторичного сырья, при котором выделяется гофрокартон, офисная и газетная бумага, полиэтиленовая (ПЭ) пленка, ПЭТ- и ПЭ-бутылка, стекло, черные и цветные металлы. Эффективность ручной сортировки ТКО заложена исходя из практики работы действующих предприятий;
- отбор энергетической фракции, направленный на выделение горючих компонентов (макулатуры и полимеров) при эффективности отбора 95 %. Для обеспечения требования по содержанию хлора в твердом топливе из отходов компоненты ПВХ удаляются из целевого потока. Наиболее эффективным оборудованием в данном случае служит оптико-механическая сортировка;

– подготовка твердого топлива из отходов – заключается в дроблении и сушке энергетической фракции (данный этап позволяет получить топливо нужного для потребителя качества).

На основании характеристик оборудования на каждом этапе обращения с ТКО далее выполнен анализ материальных потоков.

Анализ материальных потоков технологического процесса. При помощи методологии анализа материальных потоков [13] на основе исходного состава ТКО и коэффициентов трансформации для каждой операции были рассчитаны количественные и качественные показатели выходящих потоков (рис. 2).

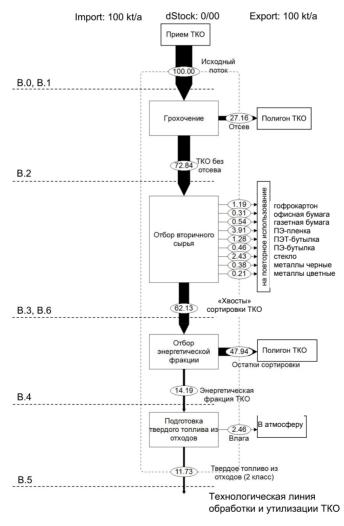


Рис. 2. Материальный баланс технологической линии обработки и утилизации ТКО (В.0–В.6 – рассматриваемые варианты)

Для вариантов В.3–В.5 из исходного потока ТКО можно получить около 11 % вторичного сырья для последующего использования и около 27 % отсева, направляемого на захоронение. При применении вариантов В.4 и В.5 образуются остатки сортировки (около 48 %), которые также направляются на полигон ТКО.

Методология экономического анализа. При выборе оптимальной технологии обработки ТКО из рассматриваемых вариантов использовался только экономический критерий, который основан на анализе параметров «затраты — выгоды» [14] с целью определения затрат на реализацию той или иной технологии с учетом экологический платежей и оценки прибыли за счет продажи вторичного сырья и экономии природного газа при его замещении твердым топливом.

К учитываемым расходам были отнесены:

- капитальные затраты, связанные со стоимостью оборудования и строительства технологического здания с учетом определенных особенностей (площадь помещения, тип и производительность оборудования, используемого на том или ином этапе, и др.) для каждого варианта и амортизационных отчислений;
- операционные затраты расходы на отопление, электроэнергию и топливо, годовой фонд заработной платы персонала, отчисления в социальные фонды, ремонт здания и оборудования и прочие расходы;
- тарифы на захоронение и сжигание ТКО и ставки платы за размещение отходов на объектах захоронения ТКО.

К доходам отнесены средства, полученные от продажи продуктов (вторичного сырья и твердого топлива из отходов).

Резульмамы и их обсуждение. Оценка материальных потоков и их теплотехнических свойств. Для эколого-экономической оценки технологий обращения с ТКО на основании исходного состава (рис. 3) и свойств ТКО и условной производительности в 100 тыс. т в год по исходным отходам рассчитаны все выходящие потоки и спрогнозированы их теплотехнические свойства: влажность, зольность, теплота сгорания [9].

Для каждого варианта рассчитаны количественные и качественные характеристики выходящих потоков ТКО в натуральных величинах (т/год), что позволяет сравнивать разные технологии друг с другом (см. рис. 2 и табл. 1).

Грохочение позволяет уменьшить влажность потока ТКО (В.2) до 38,5 %, при этом увеличивается теплота сгорания на рабочую массу до 8,7 МДж/кг. После извлечения ценных ресурсов (картон, ПЭТ-бутылка, офисная и газетная бумага, металлы и пр.) теплота сгорания на рабочую массу уменьшается до 7,7 МДж/кг, а влажность отходов повышается до

41,2 %. Отбор горючих компонентов (макулатура, полимеры) в поток энергетической фракции существенно увеличивает ее теплоту сгорания по сравнению с исходным потоком ТКО и «хвостами» сортировки.



Рис. 3. Компонентный состав исходного потока ТКО, %

Таблица 1 Теплотехнические свойства потоков, направленных на МСЗ или на цементные предприятия

Свойства	B.0, B.1	B.2	B.3, B.6	B.4	B.5
Влажность, %	42,8	38,5	41,2	25,6	10,0
Зольность на рабочую массу, %	23,3	23,8	22,6	6,8	8,3
Теплота сгорания на рабочую массу, МДж/кг	7,3	8,7	7,7	17,8	22,0

Экономическая оценка технологий обработки ТКО. При экономической оценке затраты на проектирование, строительство и эксплуатацию полигона ТКО и мусоросжигательного завода не учитывались, а задавались в виде тарифа на захоронение и сжигание ТКО соответственно. Подробная оценка выполнялась только для обработки отходов. Капитальные затраты на строительство зданий и стоимость оборудования для разных технологий обработки ТКО представлены в табл. 2.

Принято, что срок службы всего оборудования -10 лет. К капитальным затратам на строительство технологического корпуса для каждого варианта относятся затраты на проектные и строительно-монтажные ра-

боты, включая затраты на прокладку сетей инженерно-технического обеспечения (электроснабжение, водоснабжение, водоотведение и т.п.). Срок службы технологического помещения принят 30 лет.

Таблица 2 Капитальные затраты для разных технологий обработки ТКО

Опарация	Основное оборудование	Стоимость, млн руб.					
Операция	Основное оборудование	B.2	B.3	B.4	B.5	B.6	
	Грейфер		+	+	+	+	
Прием ТКО	Открыватель пакетов	+	+	+	+	+	
прием тко	Кабина предварительной	+	+	+	B.5 +	+	
	сортировки (один пост)	'		'			
Грохочение	Барабанный грохот	+	+	+	+	+	
1 рохочение	Система конвейеров	+	+	+	8.4 B.5 +	+	
Отбор вторичного	Кабина сортировки		+	+	+	+	
сырья (9 компонентов)	(5 постов)		·		'	'	
сыры (У компонентов)	Система конвейеров		+	+	+	+	
	Установка оптического			+	+		
Отбор энергетической	сканирования			'	'		
фракции	Система конвейеров			+	+		
	Компрессор			+ + + + + + + + + + + + + + + + + + +			
Подготовка твердого	Дробилка				+		
топлива из отходов	Сушилка				+		
топлива из отходов	Система конвейеров			B.4 B.5 + + + + + + + + + + + + + + + + + + +			
Дополнительное оборудование	Пресс		+	+	+	+	
	Погрузчик	+	+	+	+	+	
оборудованис	Вилочный погрузчик		+	+	+	+	
Итого		18,1	33,0	49,9	83,4	33,0	
Прочие затраты на обо	Трочие затраты на оборудование (20 %)		6,6	10,0	16,7	6,6	
Капитальные затраты на строительство корпуса		22,8	33,6	41,1	49,8	33,6	
Общие капитальные затраты		44,5	73,2	101,0	149,9	73,2	

Наиболее дорогостоящими операциями являются отбор энергетической фракции и подготовка твердого топлива из отходов, из-за стоимости установки оптического сканирования и сушилки. Общие капитальные затраты на строительство корпуса зависят от габаритов помещения, особенностей конструкций (наличия ворот, окон и т.п.). Затраты на техническое обслуживание и ремонт оборудования и помещения приняты равными 3 % от капитальных затрат на оборудование и строительство корпуса соответственно.

Операционные затраты для разных технологий обработки ТКО представлены в табл. 3.

Заработная плата персонала рассчитана с учетом сменности и численности рабочих для каждого варианта, а также налогов, отчисляемых в социальные фонды. Принято, что технологическая линия работает ежедневно 12 ч 330 дней в году. Затраты на электроэнергию приняты равными 4 руб./кВт·ч, затраты на топливо − 40 руб./л, отопление − 1757,53 руб./Гкал (Постановление Региональной службы по тарифам Пермского края от 20.12.2015 г. № 350-т «О тарифах на теплоноситель, тепловую энергию (мощность), поставляемую потребителям, услуги по передаче тепловой энергии публичного акционерного общества "Т Плюс" филиал "Пермский"»).

Таблица 3 Операционные затраты для разных технологий обработки ТКО (расчет на 1 год)

Параметры	Стоимость, млн руб.						
Паражетры		B.3	B.4	B.5	B.6		
Заработная плата персонала	7, 2	22,0	22,0	22,0	22,0		
Затраты на электроэнергию	0,27	0,33	0,80	1,28	0,33		
Затраты на топливо	0,63	0,85	0,85	0,85	0,85		
Затраты на отопление	3,9	12,4	14,7	17,4	12,4		
Прочие затраты (20 %)	2,4	7,1	7,7	8,3	7,1		
Общие операционные затраты	14,4	42,8	46,1	49,9	42,8		

Обработка ТКО при реализации В.5 связана с наибольшими затратами – около 50 млн руб., так как на удаление излишней влаги затрачивается много электрической энергии.

Тарифы на утилизацию (захоронение) твердых коммунальных отходов приняты на основании постановления Региональной энергетической комиссии Пермского края от 15.11.2012 г. № 219-о «О максимальных предельных тарифах на услуги по утилизации (захоронению) твердых бытовых отходов для потребителей ООО "Буматика" (Краснокамский район)»: для несортированных ТКО – 561,88 руб./т (В.0) для сортированных ТКО – 264,63 руб./т (В.1–6). Тариф на термическое обезвреживание ТКО принят равным 2852,03 руб./т (по аналогии со сжиганием отходов на МСЗ № 4 г. Москвы, ГУП «Экотехпром») [15]. Тариф на сжигание ТКО был принят для В.1–3, так как отходы не обработаны и не соответствуют требованиям, установленным к качеству твердого топлива из отходов.

Энергетическая фракция и твердое топливо, полученные из «хвостов» сортировки (В.4 и В.5), обладают достаточно высокой теплотой сгорания, поэтому было принято, что энергетическая фракция В.4 имеет нулевую стоимость и направляется потребителям бесплатно, в связи с ее высокой

влажностью, а твердое топливо из отходов В.5 имеет среднюю рыночную стоимость 1000 руб./т [16]. В ходе проведения экономической оценки доходов от реализации вторичного сырья приняты средние значения цен.

Ставки платы за негативное воздействие на окружающую среду приняты согласно постановлению Правительства РФ от 13.09.2016 г. № 913 (ред. от 09.12.2017 г.) «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах»: за размещение отходов IV класса опасности — 663,2 руб./т ТКО (В.0), за размещение отходов V класса опасности — 17,3 руб./т ТКО (согласно Федеральному классификационному каталогу отходов к данному классу относятся обработанные отходы, т.е. захораниваемые потоки В.1–6).

Результаты расчетов основных экономических показателей для рассматриваемых технологий представлены в табл. 4.

Таблица 4 Основные экономические показатели технологий обработки ТКО

Наименование	Экономический эффект, млн руб.						
паименование	B.0	B.1	B.2	B.3	B.4	B.5	B.6
Расходы на захоронение	-56,2		-7,2	-7,2	-19,9	-19,9	-23,6
Расходы на сжигание		-285,2	-207,7	-177,2			
Доходы от реализации вторично-				89,0	89,0	89,0	89,0
го сырья				69,0	69,0	09,0	69,0
Доход от реализации твердого					0,0	11,7	
топлива из отходов					0,0	11,/	
Экологические платежи за отходы	-66,3		-0,5	-0,5	-1,3	-1,3	-1,5
Затраты на обработку (капиталь-			-17,7	-48,0	-53,7	-61,9	-48,0
ные и эксплуатационные)			-1/,/	-4 8,0	-55,7	-01,9	-40,0
Всего	-122,5	-285,2	-233,1	-143,9	14,1	17,7	15,8

Расходы на захоронение золы, образующейся после сжигания отходов на МСЗ, а также экологические платежи за размещение золы на полигоне ТКО не учитывались, так как данные расходы учтены в тарифах на сжигание ТКО.

Доход от реализации вторичного сырья для В.3–6 составляет около 89 млн руб./год, доход от реализации металлов, выделенных из золы, не учитывается, так как прибыль получают МСЗ (доход должен быть учтен в тарифе). Для В.5 дополнительным доходом является продажа твердого топлива (около 12 млн руб./год).

Экономический эффект разных технологий представлен на рис. 4, где красным цветом показан наиболее распространенный метод утилизации

отходов в $P\Phi$ — захоронение ТКО; зеленым цветом показаны методы термической утилизации с разной системой обработки ТКО; оранжевым цветом — приемлемый метод обработки ТКО без использования термической утилизации.



Рис. 4. Экономический эффект разных технологий обработки ТКО

При использовании В.0 «Захоронение ТКО на ОРО» общие расходы составляют 122,5 млн руб. Для В.1–3 общие валовые затраты выше по сравнению с захоронением всех отходов и другими технологиями обработки ТКО, из-за высокого тарифа на сжигание отходов. Технологии с выделением вторичного сырья существенно снижают расходы на утилизацию ТКО (кроме сжигания отходов на МСЗ, из-за высокого тарифа) по сравнению с традиционной системой обращения с отходами.

Наибольшая экономическая эффективность достигается при реализации В.5 (17,7 млн руб.), даже с учетом применения сушки, которая потребляет много электроэнергии.

Важно отметить, что подготовка твердого топлива из отходов (измельчение и сушка) из энергетической фракции связана с дополнительными технологическими операциями и затратами, поэтому В.4 лишь немного уступает В.5 по экономическому эффекту.

Экономический эффект В.4–6 отличается несущественно, однако при использовании В.4 и В.5 значительно меньше отходов складируется на объектах захоронения ТКО, что влечет за собой снижение нагрузки на окружающую среду. Таким образом, данный «экологический» эффект В.4–5

также необходимо учитывать при выборе технологий. На рис. 5 представлены массы захораниваемых отходов для каждого варианта.

Из рис. 5 видно, что наибольшее снижение массы захораниваемых ТКО происходит при использовании В.1, так как весь поток ТКО направляется на МСЗ, и только зола (около 23 % от массы первоначальных отходов) отправляется на захоронение. Термическая утилизация (обезвреживание) необработанных отходов существенно сокращает массу захораниваемых ТКО, однако связана с наибольшими затратами. Поэтому при выборе технологии обработки ТКО для их последующей термической утилизации следует учитывать не только снижение массы ТКО, направленной на захоронение, но и технико-экономические показатели технологий.

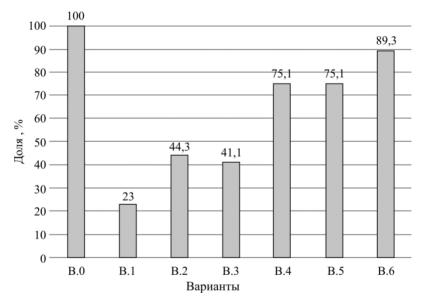


Рис. 5. Доля отходов, отправляемых на захоронение (с учетом захоронения золы), %

Заключение. Предложенный подход к технико-экономической оценке технологий обращения с ТКО позволяет обосновать эффективность использования той или иной технологии с учетом капитальных и операционных затрат, доходов от реализации вторичного сырья и твердого топлива из отходов, расходов на захоронение и сжигание ТКО и экологических платежей за размещение отходов на объектах захоронения отходов.

Экономическая оценка технологии обработки ТКО позволила установить, что даже при высоких затратах на подготовку твердого топлива из отходов можно достичь экономического эффекта при ее внедрении.

Технико-экономическая оценка технологий обработки ТКО для их последующей термической утилизации показала, что использование энергетического потенциала ТКО путем выделения, подготовки и использования твердого топлива из отходов позволяет добиться экономической эффективности технологии и при этом снизить нагрузку на окружающую среду.

Библиографический список

- 1. Advances in the valorization of waste and by-product materials as thermal energy storage (TES) materials / A. Gutierrez, L. Miró, A. Gil, J. Rodríguez-Aseguinolaza, C. Barreneche, N. Calvet, X. Py, I. Fernández, M. Grágeda, S. Ushak, L.F. Cabeza // Renew. Sustain. Energy Rev. − 2016. − № 59. − P. 763–783.
- 2. Тугов А.Н., Родионов В.И. Термическая переработка ТКО в мире // Твердые бытовые отходы. -2016. № 9. С. 28-31.
- 3. Уланова О.В., Салхофер С.П., Вюнш К. Комплексное устойчивое управление отходами. Жилищно-коммунальное хозяйство: учеб. пособие. М.: Издательский дом Академии Естествознания, $2016.-520\ c.$
- 4. Энергетическая утилизация твердых бытовых отходов. Энергетический бюллетень. Май 2017. Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: http://ac.gov.ru/files/publication/a/13175.pdf (дата обращения: 04.04.2018).
- 5. Marchese F., Genon G. Effect of leaching behaviour by quenching of bottom ash from MSW incineration // Waste Management & Research. 2011. № 29 (10). P. 39–47.
- 6. Конюхов В.Ю., Холодилова Е.В. «Мусорная» энергетика // Молодежный вестник ИрГТУ. 2016. № 1. С. 21–23.
- 7. Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities / J.M. Fernández-González, A.L. Grindlay, F. Serrano-Bernardo, M.I. Rodríguez-Rojas, M. Zamorano // Waste Management. 2017. № 67. P. 360–374.
- 8. Тулохонова А.В., Уланова О.В. Социально-экономическая оценка систем управления твердыми бытовыми отходами // Управление экономическими системами: электрон. науч. журн. -2012. -№ 9 (45). C. 44.
- 9. Полыгалов С.В., Ильиных Г.В., Коротаев В.Н. Зависимость теплотехнических свойств твердых коммунальных отходов от их компонентного и фракционного состава // Теоретическая и прикладная экология. -2018. -№ 2. -C. 70–78. DOI: 10.25750/1995-4301-2018-2-070-078.
- 10. Lederer J., Trinkel V., Fellner J. Wide-scale utilization of MSWI fly ashes in cement production and its impact on average heavy metal contents in cements: The case of Austria // Waste Management. -2017. N = 60. P. 247-258.
- 11. Энергия из отходов [Электронный ресурс]. URL: https://w2e.ru (дата обращения: 02.06.2018).
- 12. Challenges and opportunities for energy recovery from municipal solid waste in the Russian Federation / S. Polygalov, G. Ilinykh, N. Sliusar, V. Korotaev, I. Rukavishnikova // WIT Press Conference Papers 'Energy Quest' 2018. 10–12 September.
- 13. Brunner P.H., Rechberger H. Practical handbook of material flow analysis // Advanced methods in resource and waste management series. − 2004. − № 1. − URL: http://bookre.org/reader?file=1024762&pg=4.
- 14. Старостина В.Ю., Уланова О.В. Использование методов оценки воздействия на окружающую среду при выборе перспективного способа обращения с отходами производства и потребления // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. C. 49–56.
- 15. Тарифы на термическое обезвреживание ТКО на Мусоросжигательном заводе № 4 г. Москвы [Электронный ресурс]. URL: http://www.eco-pro.ru/tarify-na-uslugi (дата обращения: 01.06.2018).
- 16. Багданас В.В., Тихонова И.О. Разработка требований к производству альтернативного топлива на полигонах твердых коммунальных отходов // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. XXXI. № 9. С. 62-64.

References

- 1. Gutierrez, A., Miró, L., Gil, A., Rodríguez-Aseguinolaza, J., Barreneche, C., Calvet, N., Py, X., Fernández, I., Grágeda, M., Ushak, S., Cabeza, L.F., Advances in the valorization of waste and by-product materials as thermal energy storage (TES) materials. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, no. 59, pp. 763–783.
- 2. Tugov A.N., Rodionov V.I. Termicheskaya pererabotka TKO v mire [Thermal processing of MSW in the world]. Municipal solid waste magazine, 2016, no. 9, pp. 28-31.
- 3. Ulanova O.V., Salhofer S.P., Vyunsh K. Kompleksnoe ustojchivoe upravlenie othodami ZHilishchno-kommunalnoe hozyajstvo [Integrated sustainable waste management. Housing and communal services]: uchebnoe posobie, Moscow: Izdatelskij dom Akademii Estestvoznaniya, 2016, 520 p.
- 4. Energeticheskaya utilizaciya tverdyh bytovyh othodov. Energeticheskij byulleten. Maj 2017 Analiticheskij centr pri pravitelstve Rossijskoj Federacii, available at: http-ac-gov-ru-files-publication-a-13175-pdf (accessed 04 April 2018).
- 5. Marchese F., Genon G. Effect of leaching behaviour by quenching of bottom ash from MSW incineration // Waste Management & Research, 2011, no. 29(10), pp. 39–47.
- 6. Konyuhov V.Yu., Holodilova E.V. Musornaya ehnergetika [Waste-to-energy]. *Molodezhnyj vestnik IRGTU*, 2016, no. 1, pp. 21-23.
- 7. Fernández-González J.M., Grindlay A.L., Serrano-Bernardo F., Rodríguez-Rojas M.I., Zamorano M. Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities. *Waste Management*. 2017, no. 67, pp. 360–374.
- 8. Tulohonova A.V., Ulanova O.V. Socialno-ehkonomicheskaya ocenka sistem upravleniya tverdymi bytovymi othodami [Socio-economic assessment of solid waste management systems]. *Ehlektronnyj nauchnyj zhurnal*, 2012, no. 9 (45), p. 44.
- 9. Polygalov S.V., Ilinyh G.V., Korotaev V.N. Zavisimost teplotekhnicheskih svojstv tvyordyh kommunalnyh othodov ot ih komponentnogo i frakcionnogo sostava [Thermotechnical properties of municipal solid waste depending upon component and fractional composition]. *Theoretical and applied Ecology*, 2018, no. 2, pp. 70-78. DOI: 10.25750/1995-4301-2018-2-070-078.
- 10. Lederer J., Trinkel V., Fellner J. Wide-scale utilization of MSWI fly ashes in cement production and its impact on average heavy metal contents in cements: The case of Austria. *Waste Management*, 2017, no. 60, pp. 247-258.
 - 11. Energiya iz othodov, available at: https-w2e-rudata obrashcheniya (accessed 02 June 2018).
- 12. Polygalov S., Ilinykh G., Sliusar N., Korotaev V., Rukavishnikova I. Challenges and opportunities for energy recovery from municipal solid waste in the Russian Federation. *WIT Press Conference Papers 'Energy Quest'* 2018, 10-12 September.
- 13. Brunner P.H., Rechberger H. Practical handbook of material flow analysis. Advanced methods in resource and waste management series. 2004, no. 1, available at: http://bookre.org/reader?file=1024762&pg=4.
- 14. Starostina V.Yu., Ulanova O.V. Ispolzovanie metodov ocenki vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredu pri vybore perspektivnogo sposoba obrashcheniya s othodami proizvodstva i potrebleniya [The using of different methods of environmental impact assessment to choose the most perspective way of waste management]. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, 2013, no. 5, pp. 49-56.
- 15. Tarify na termicheskoe obezvrezhivanie TKO na Musoroszhigatelnom zavode 4 g Moskvy, available at: http://www.eco-pro.ru/tarify-na-uslugi (accessed 01 June 2018).
- 16. Bagdanas V.V., Tihonova I.O. Razrabotka trebovanij k proizvodstvu alternativnogo topliva na poligonah tverdyh kommunalnyh othodov [Develop requirements for alternative fuel production in landfills of solid municipal waste]. *Uspekhi v himii i himicheskoj tekhnologii*, T. XXXI, 2017, no. 9, pp. 62-64.

Получено 10.09.2018

S. Polygalov

TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF MUNICIPAL SOLID WASTE TREATMENT TECHNOLOGIES FOR SUBSEQUENT ENERGY RECOVERY

In the article the approaches to the implementation of technical and economic assessment of municipal solid waste (MSW) treatment technologies for their subsequent energy utilization are presented. Using the proposed algorithm, a technical and economic assessment of 6 different technologies of MSW treatment with pretreatment or without it, including the landfilling, sorting with the separation of secondary raw materials, incineration and 4 options for thermal utilization after different pretreatment. Field and laboratory studies of MSW component composition and their thermal properties (water content and ash content) were performed, which allowed to predict the qualitative and quantitative characteristics of the output MSW flows for all the considered options. Based on the analysis of material flows, the masses of incinerated waste and products of their utilization for different technologies are calculated. Taking into account capital and operational costs, tariffs for disposal and incineration of MSW, rates of payments for waste disposal at MSW disposal facilities, as well as revenues from the sale of products (secondary raw materials and refuse derived fuel), an economic assessment of the technologies under consideration was made, which allowed to determine the most cost-effective technology for MSW treatment. Economic assessment of MSW treatment technologies allowed establishing that even at high costs for preparing the production of refuse derived fuel, it is possible to achieve economic benefits in its implementation.

Keywords: municipal solid waste, refuse derived fuel, water content, calorific value, capital costs, operating costs.

Полыгалов Степан Владимирович (Пермь, Россия) – ассистент кафедры «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: polyste17@yandex.ru).

Polygalov Stepan (Perm, Russian Federation) – Assistant of Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: polyste17@yandex.ru).