

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОЛИГОНОВ ЗАХОРОНЕНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Ю.В. Завизион, Н.Н. Слюсарь, В.Н. Коротаев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Рассмотрены методы оценки состояния полигонов захоронения твердых коммунальных отходов (ТКО) на различных этапах жизненного цикла и их воздействия на окружающую среду. Представлены результаты исследования оценки степени стабильности отходов разного срока захоронения по физико-химическим, биохимическим, термическим параметрам. На основании результатов физико-химических и биохимических показателей определены стадии биodeградации и степень разложения отходов относительно срока захоронения отходов. Предложено оценивать стабильность отходов в массиве полигона по ряду термических параметров отходов: величине тепловых эффектов, температуре пиков тепловыделения, скорости потери массы, отношению удельных энтальпий сухого вещества (СВ) и органического сухого вещества (ОСВ). Разработана методика комплексной оценки стабильности ТКО в массиве полигона, включающая установление классов стабильности отходов, граничных значений индикаторных показателей стабильности и периодов их достижения. Методика предназначена для геоэкологической оценки состояния полигонов захоронения ТКО и обоснования выбора технических мероприятий по снижению эмиссий.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, полигон, свалка, стабильность отходов, оценка состояния полигона

Geoecological Assessment of the Condition of Municipal Solid Waste Landfills

Yu.V. Zavizion, N.N. Slyusar, V.N. Korotaev

Perm National Research Polytechnic University, 614000 Perm, Russia

Methods for assessing the state of landfills for municipal solid waste (MSW) at various stages of the life cycle and their impact on the environment are considered. The results of a study assessing the degree of stability of waste of different periods of disposal according to physicochemical, biochemical, thermal parameters are presented. Based on the results of physicochemical and biochemical parameters, the stages of biodegradation and the degree of decomposition of the waste are determined relative to the disposal period of the waste. It was proposed to assess the stability of waste in an array of landfill by a number of thermal parameters of waste: the magnitude of thermal effects, the temperature of heat generation peaks, the rate of mass loss, the ratio of specific enthalpies of dry matter (DM) and organic dry matter (ODS). A method for integrated assessment of the stability of MSW in an array of landfill was developed, including the establishment of waste stability classes, boundary values of stability indicators and periods of their achievement. The method is intended for geoecological assessment of the condition of disposal of MSW and justify the choice of technical measures to reduce emissions.

Key words: municipal solid waste, landfill, waste dump, waste stability, landfill state assessment

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-07-50-56

Рост и развитие городов привели к образованию обширных территорий, занятых размещением твердых коммунальных отходов, данные объекты техногенные и в совокупности с компонентами геосреды образуют природно-техногенную систему (ПТС). Процессы биохимического и химического разложения отходов, происходящие в техногенных образованиях, формируют эмиссии загрязняющих веществ, оказывающие не-

гативное воздействие на геосферные оболочки как на этапе эксплуатации объекта, так и после его закрытия и рекультивации.

Уровень воздействия полигона захоронения отходов на объекты окружающей среды зависит от многих факторов, в том числе от компонентного состава и влажности отходов, климатических условий, технологий эксплуатации полигона, качественных и количественных парамет-

ров эмиссий, наличия применяемых природоохранных сооружений и т.д. [1, 2]. Долговременная опасность полигона обусловлена отрезком времени, на протяжении которого отходы, захороненные в массиве полигона, обладают потенциальной опасностью. Нарушенная воздействием полигонов захоронения отходов геосреда может также негативно влиять на техногенное образование в результате формирования в нем фрагментов не-

однородной структуры, изменения состава и свойств отходов, нарушения устойчивости массива, обводнения прилегающей территории и т.д. [1].

В настоящее время возникла необходимость создания управляемых ПТС, позволяющих поддерживать и регулировать состояние компонентов геосреды, не допуская их ухудшения до уровня негативного воздействия на жизнедеятельность человека и других организмов. Управляемый полигон захоронения ТКО как часть ПТС может выполнять задачи, направленные на предупреждение или предотвращение негативного воздействия на состояние основных компонентов геосреды [3]. Авторами [1–3] установлено, что попытка управления отдельными частями ПТС без учета состояния других не может обеспечить устойчивого состояния ПТС как единого целого. Таким образом, необходимо управлять не только эмиссиями, оказывающими негативное воздействие на компоненты геосреды, но и состоянием полигона [4].

Современная концепция управления отходами базируется на принципах устойчивого развития и минимизации их воздействия на окружающую среду. Для экологической оценки воздействия полигонов захоронения ТКО используется термин "устойчивый полигон", т.е. полигон, массив отходов которого находится в стабильном состоянии с точки зрения конструктивной (отсутствие просадок поверхности) и биохимической стабильности [5].

От совокупности форм и состояния взаимодействия полигона с природной системой на этапах жизненного цикла зависит функционирование ПТС. Большое практическое значение имеет оценка стабильности отходов в массиве захоронения на разных этапах жизненного цикла и оценка состояния полигонов захоронения ТКО как элементов ПТС. Под стабильными отходами понимаются такие отходы, при разложении которых эмиссия загрязняющих веществ не оказывает негативного воздействия на окружающую среду и здоровье человека.



Рис. 1. Основные этапы методики оценки стабильности твердых коммунальных отходов в массиве полигона

Fig. 1. The main stages of the methodology for assessing the stability of municipal solid waste in an array of landfill

Анализ российского и зарубежного опыта определения стабильности [6–9] захороненных на полигонах отходов показал, что для этих целей используются методы определения стандартных физико-химических параметров отходов и фильтрата (содержание органического вещества, аммонийного азота, рН, ХПК, БПК₅ и т.д.); аэробные и анаэробные биологические тесты (GS₂₁, RI₄), позволяющие определить потенциал окисления органической составляющей ТКО и биогазовый потенциал отходов [7]. Авторами [8] были предложены параметры и их граничные значения для оценки стабильности отходов, на основании которых объект захоронения отходов можно считать стабильным. Контролируемыми показателями в фильтрате являются: ХПК, аммонийный азот (NH₄-N), хлориды; в биогазе оценивается объем образования метана; в образцах отходов контролируются показатели биодеструкции отходов (RI₄ ≤ 2,5 мгО₂/г СВ) и т.д.

Альтернативным методом оценки стабильности отходов является метод термического анализа, который объединяет термогравиметрию (ТГ) и дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК). Метод позволяет получать информацию о составе, термической и окислительной стабильности материалов, фазовых переходах,

температурах протекания и кинетике химических реакций. Авторы [10] оценили возможность использования ТГ и ДСК для оценки процесса компостирования ТКО и растительных отходов. В работе [11] представлены термические характеристики, используемые для оценки процессов стабилизации осадка сточных вод на полигонах захоронения отходов. Авторами [12] термический анализ использован для оценки содержания органического вещества свежих и захороненных отходов. Определено, что в процессе разложения отходов происходит снижение в них органических веществ, что подтверждается снижением интенсивности теплового потока.

Несмотря на значительный объем научных исследований, проводимых в России и зарубежных странах, сложной задачей, до сих пор не решенной однозначно, является определение физико-химических и биохимических параметров отходов разного срока захоронения и установление параметров достижения стабильности отходов в массиве полигона. В настоящее время разработанные методы оценки состояния полигона захоронения ТКО являются трудоемкими и длительными.

Цель исследований — разработка методики комплексной оценки стабильности отходов разного срока захоронения,

Таблица 1. Основные физико-химические и биохимические параметры отходов разного срока захоронения
Table 1. Basic physico-chemical and biochemical parameters of waste of different periods of disposal

Срок захоронения, годы	$C_{\text{общ.}}$	$C_{\text{орг.}}$	ХПК	БПК ₅	Зольность, % СВ	RI ₄ , мгO ₂ /г СВ	GS ₂₁ , л/кг СВ
	г/кг СВ						
1,5	223,0±1,1	176,0±0,9	4281,0±1027,4	2150,0±516,8	36,9±1,1	11,3±0,23	40,7±1,5
3	191,0±1,0	188,0±0,9	1820,0±436,8	950,0±228,4	55,4±1,7	6,7±0,13	27,1±0,6
5	187,0±0,9	177,0±0,9	1245,0±298,8	520,0±228,4	59,2±1,8	5,9±0,12	16,1±0,7
15	90,0±0,5	64,0±0,3	493,0±118,3	185,0±44,5	79,2±2,4	3,8±0,08	7,2±0,2
30	80,0±0,4	68,0±0,3	309,0±74,2	120,0±28,8	85,1±2,6	2,6±0,05	5,8±0,3
50	69,0±0,3	59,0±0,3	150,0±36,0	20,0±4,8	89,2±2,7	1,7±0,03	1,9±0,1
60	60,0±0,3	57,0±0,3	115,0±27,6	10,0±2,4	94,1±2,8	0,3±0,01	1,9±0,1

предназначенная для геоэкологической оценки состояния полигонов захоронения ТКО.

Материалы и методы исследования

Для исследования выбраны типичные объекты захоронения ТКО, характеризующиеся разным сроком захоронения отходов и находящиеся на разных этапах жизненного цикла, но имеющие схожую технологию складирования отходов: четыре объекта захоронения отходов в Пермском крае и один объект захоронения отходов в Свердловской области. Выбранные объекты расположены в схожих климатических условиях и характеризуются близким компонентным составом захороненных отходов.

Разработанная методика комплексной оценки стабильности отходов разного срока захоронения включает в себя ряд этапов, представленных на рис. 1.

Первым этапом являются предварительные исследования массива полигона, включающие сбор первичной информации о состоянии объекта (информация от операторов, эксплуатирующих полигоны, анализ инженерных изысканий, результаты мониторинга), определяется местоположение точек отбора проб, количество проб.

Следующий этап — полевые исследования, включающие работы по экскавации отходов из массива полигона и отбор проб. Отбор проб отходов на полигоне выполняется посредством ковшового экскаватора по профилю массива с шагом в 1,0–2,0 м по вертикали. Минимальная масса отбираемой пробы должна составлять 100 кг. После отбора проб и доставки

их в лабораторию в максимально короткий срок проводится определение исходной влажности каждой пробы отходов, а также фракционного и морфологического состава отходов. Сроки захоронения отходов устанавливаются в процессе определения морфологического и фракционного состава отходов. В случаях, когда установление срока захоронения отходов по информации на упаковках невозможно, возраст отходов принимается на основании дат начала, окончания эксплуатации и рекультивации отдельных карт, а также по данным геологических изысканий и информации от операторов, эксплуатирующих полигоны.

Подготовка проб для лабораторных исследований включает отсеивание инертной части отходов, сушку (при $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$), последовательное измельчение проб до частиц размером $D \leq 20\text{ мм}$ — для физико-химических и биохимических анализов и $D \leq 0,2\text{--}0,3\text{ мм}$ — для термического анализа. Водные вытяжки отходов для анализов готовятся согласно ГОСТ 26423-85 в соотношении с дистиллированной водой 1:5. Известно, что при деформации отходов происходит формирование свалочного грунта, по свойствам аналогичного техническому урбанизированному грунту [13], поэтому при анализах были использованы методики анализа почв.

Лабораторные исследования образцов отходов включают в себя определение биохимических параметров: потенциала газообразования (GS_{21}); показателя дыхательной активности (RI_4); физико-химических параметров — рН, ХПК, БПК₅, содержания ам-

монийного ($NH_4\text{-N}$) и общего ($N_{\text{общ.}}$) азота, общего ($C_{\text{общ.}}$) и органического углерода ($C_{\text{орг.}}$), зольности. Репрезентативность проводимых лабораторных исследований обеспечивается выполнением трех повторений для каждой пробы.

Термический анализ отходов проводится на приборе NETZSCH "STA 449C Jupiter" в среде воздуха. Условия проведения анализа: диапазон нагрева 35–800 °С, скорость нагрева — 10 °С/мин, скорость газового потока в печи — 40 мл/мин, материал тигля — платина. Определяются следующие термические параметры отходов: величина тепловых эффектов, температура пиков тепловыделения, скорость потери массы, отношения удельный энтальпий сухого вещества (теплосодержание образца в пересчете на сухое вещество) и органического сухого вещества (теплосодержания органического вещества в образце при пересчете на сухое вещество), константа скорости разложения ($K_{\text{с.р.}}$).

Лабораторное моделирование процессов разложения отходов проводится в биореакторах. Ускорение процессов их разложения происходит за счет добавления воды. Срок нахождения отходов в лабораторных биореакторах пересчитывается на реальные условия полигона.

Зависимости полевых и лабораторных исследований по физико-химическим, биохимическим и термическим параметрам от срока захоронения отходов используются для определения граничных значений индикаторных показателей стабильности отходов с последующим установлением классов стабильности отходов.

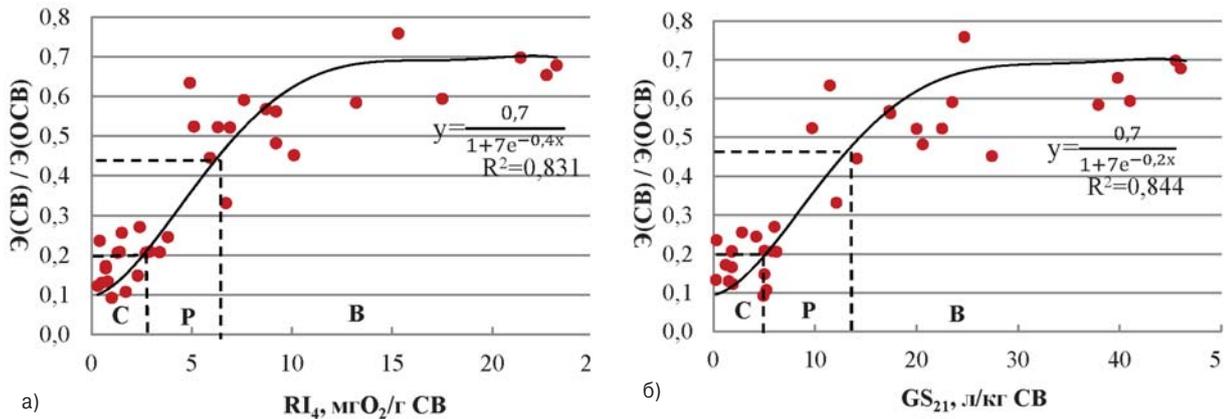


Рис. 2. Зависимость отношения удельных энтальпий СВ и ОСВ от дыхательной активности (а) и потенциала газообразования отходов (б)

Fig. 2. Dependence of the ratio of specific enthalpies of DM and ODM on respiratory activity (a) and gassing potential of waste (b)

Результаты и обсуждение

Биохимические и физико-химические параметры отходов

Анализ проб отходов разного срока захоронения включал определение ряда биохимических и физико-химических параметров, в том числе показателей органической составляющей отходов, эмиссионных характеристик, показателей, связанных с процессами газообразования. Основные физико-химические и биохимические параметры исследуемых образцов отходов представлены в табл. 1.

На основании полученных данных были выявлены основные физико-химические и биохимические параметры отходов, позволяющие определить стадии биодеструкции и степень разложения отходов: ХПК, БПК₅, общий и органический углерод, показатель дыхательной активности, потенциал газообразования. Индикатором изменения содержания органических соединений в отходах может служить отношение БПК₅/ХПК. Установлены следующие отношения БПК₅/ХПК отходов разного срока захоронения: 1–5 лет — 0,54; 5–10 лет — 0,45; 10–20 лет — 0,23; 20–40 лет — 0,21; более 40 лет — 0,15.

Полученные значения ХПК, БПК₅ водных вытяжек отходов сроком захоронения до 5 лет позволяют сделать предположение о протекающей стадии активного метанолиза, низкие значения ХПК, БПК₅ водных вытяжек отходов возраста более 40 лет — об окончании фазы стабильного метанолиза

и наступления периода ассимиляции [14].

С увеличением срока захоронения отходов наблюдается последовательное снижение содержания органического вещества и увеличение зольности. В отходах сроком захоронения более 40 лет содержание органического вещества меньше в 6 раз по сравнению с "молодыми" отходами. На основании результатов определения содержания органического вещества и зольности было установлено, что в отходах возраста захоронения 1–5 лет интенсивно протекают процессы разложения органических компонентов. Данные отходы характеризуются высоким содержанием органического вещества и наименьшим показателем зольности, что свидетельствует о незначительной степени разложения отходов. Установлены следующие отношения показателей органическое вещество/зольность образцов отходов разного срока захоронения: 1–5 лет — 1,26; 5–10 лет — 1,14; 10–20 лет — 0,3; 20–40 лет — 0,2; более 40 лет — < 0,14.

Важным параметром определения биодеструкции отходов является показатель дыхательной активности (RI_4), результаты определения которого показали, что за первые 10 лет после захоронения отходов дыхательная активность снижается в 3,4 раза. Для отходов возраста более 20 лет показатель достигает приемлемых уровней ($RI_4 \leq 2,0$) [15]. При сравнении полученных результатов определения дыхательной активности с содержа-

нием органического вещества наблюдается динамика снижения значения дыхательной активности при уменьшении содержания органического вещества в отходах. Данный параметр можно использовать в качестве показателя биодеструкции отходов.

Снижение значений дыхательной активности можно объяснить увеличением степени разложения отходов и, соответственно, сокращением количества образующегося биогаза. Установлено, что с увеличением срока захоронения отходов потенциал газообразования (GS_{21}) уменьшается. У отходов сроком захоронения 1–3 года отмечается достаточно высокая способность к газообразованию — среднее значение суммарного газообразования за 21 день составляет 40–45 л/кг СВ, тогда как отходы, срок захоронения которых составляет более 30 лет, характеризуются средним значением показателем $GS_{21} = 4,0$ л/кг СВ, что в 8 раз меньше этого показателя для молодых отходов. Для отходов сроком захоронения более 30 лет потенциал газообразования достигает приемлемых уровней ($GS_{21} \leq 5,0$) [15].

Данные физико-химические и биохимические параметры позволяют оценить стабильность отходов, но их определение является достаточно трудоемким и длительным.

Термические параметры отходов

В ходе термического анализа определялись следующие термические параметры отходов: ве-

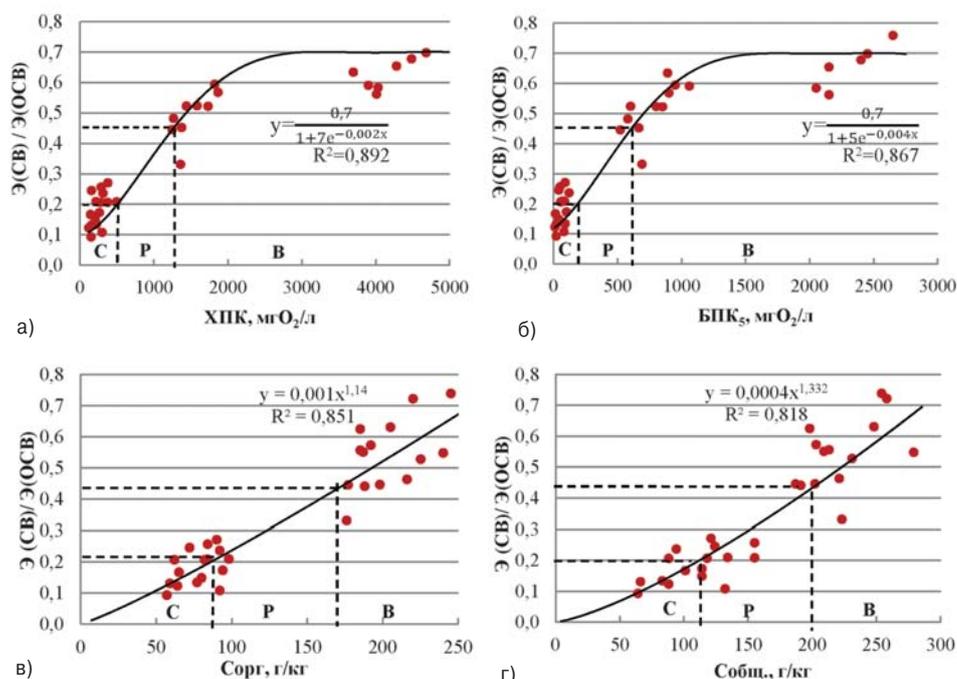


Рис. 3. Зависимость отношения Э(СВ) и Э(ОСВ) от физико-химических параметров исследуемых образцов отходов:

а – ХПК; б – БПК₅; в – органический углерод; г – общий углерод

Fig. 3. Dependence of the ratio of E (DM) and E (ODM) on the physicochemical parameters of the studied samples of waste:

а – COD; б – BOD₅; в – organic carbon; г – total carbon

личина тепловых эффектов, температура пиков тепловыделения, потеря массы, отношение удельных энтальпий (Э) СВ и ОСВ, константа скорости разложения отходов. Для сравнительной характеристики процессов деструкции отходов использовали образцы дерново-подзолистой почвы.

В табл. 2 представлены основные термические параметры отходов разного срока захоронения.

По кривым ДСК выявлено смещение пиков начала окисления образцов (интервал $T = 220 \div 550 \text{ }^\circ\text{C}$) в более высокую область температур и снижение их интенсивности с увеличением срока захоронения в сравнении с

отходами малого срока захоронения (1–5 лет), что свидетельствует об увеличении степени стабильности отходов. Начало окисления образцов сроком захоронения отходов более 50 лет и дерново-подзолистой почвы практически совпадают [15].

По кривым ДСК были рассчитаны удельные энтальпии СВ и ОСВ. Определено, что энтальпия СВ отходов уменьшается с прогрессирующей деградацией органических веществ. Энтальпия ОСВ отходов, наоборот, увеличивается за счет химических изменений и присутствия инертных компонентов в отходах. На основании полученных данных была выявлена зависимость отношения Э(СВ)/Э(ОСВ), пока-

зывающая изменение содержания разлагаемых органических компонентов в отходах.

По кривым ТГ установлена зависимость потери массы отхода от срока захоронения. При повышении температуры от 220 до 550 °С происходит достаточно быстрое уменьшение массы, обусловленное термическим разложением органических веществ, содержащихся в образце. По результатам ТГ была рассчитана константа скорости разложения образцов $K_{с.р.}$ в интервале $T = 220 \div 550 \text{ }^\circ\text{C}$ (разложение органических веществ), которая снижается с увеличением срока захоронения отходов и повышением стабильности отходов: $K_{с.р.(220-550^\circ\text{C})} > 0,017$ (до 5 лет); $K_{с.р.(220-550^\circ\text{C})} = 0,007 \div 0,017$ (5–30 лет); $K_{с.р.(220-550^\circ\text{C})} < 0,007$ (более 30 лет).

На основании полученных результатов биохимических, физико-химических, термических параметров были установлены индикаторные показатели стабильности отходов.

Для верификации результатов полевых исследований проведено лабораторное моделирование процессов разложения отходов в биореакторах. Для подтверждения того, что полученные уравнения индикаторных показателей стабильности отходов описывают один и тот же процесс и относятся к одной генеральной совокупности данных, проводилось сравнение полученных результатов полевых и лабораторных исследований.

Установление граничных значений индикаторных показателей стабильности отходов

По результатам проведенных анализов определения физико-химических, биохимических, термических параметров отходов разного срока захоронения была разработана методика комплексной оценки стабильности ТКО в массиве полигона на этапах жизненного цикла. Методика оценки стабильности ТКО предполагает установление классов стабильности отходов, граничных значений индикаторных параметров стабильности и периодов их достижения. Для определения граничных значений индикаторных показателей стабильности отходов была установлена зависимость дыхательной активности (RI₄) и потенциала газообразова-

Таблица 2. Термические параметры отходов разного срока захоронения
Table 2. Thermal parameters of waste of different period of disposal

Срок захоронения, лет	Экзотермические пики, °С	Энтальпия СВ, Дж/г	Э(СВ)/Э(ОСВ)	Потеря массы, %	$K_{с.р.}$
1,5	239,6; 330,7; 416,6; 452,2	9623	0,548	71,34	0,0457
3	241,3; 359,7; 437,5; 463,2	6558	0,528	67,94	0,0226
5	316,3; 330,7; 434,4; 464,1	4663	0,237	49,84	0,0168
15	224,8; 320,8; 382,8; 407,3	2932	0,209	41,42	0,0079
30	321,8; 427,7; 455,6	1710	0,173	31,22	0,0065
50	322,7	1220	0,149	12,21	0,0032
60	329,7	669	0,101	9,88	0,0011

ния отходов (GS_{21}). Данные биохимические параметры могут говорить о реакционной способности отходов и позволяют определить период, когда эмиссия в окружающую среду будет минимальная.

На основании полученных результатов определения дыхательной активности отходов и потенциала газообразования установлены граничные значения, при которых отходы могут считаться стабильными: $RI_4 \leq 2,0$ и $GS_{21} \leq 5,0$; при более высоких значениях отходы являются реактивными и могут оказывать негативное воздействие на объекты окружающей среды. Вследствие того, что данные методы оценки стабильности отходов достаточно трудоемки и длительны, предложено использовать термический анализ захороненных отходов. Полученные в результате термического анализа значения отношения $\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}}$ сравнили со значениями дыхательной активности и потенциала газообразования отходов. Зависимости отношения $\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}}$ от дыхательной активности и потенциала газообразования отходов, представлены на рис. 2, а и б соответственно.

Для определения граничных значений физико-химических параметров отходов и периодов их достижения были установлены зависимости относительно отношения $\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}}$ (рис. 3).

На этапах жизненного цикла объекта выявлены логистические зависимости отношения $\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}}$ от показателя дыхательной активности, потенциала газообразования отходов, ХПК, БПК₅; экспоненциальные зависимости отношения $\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}}$ от содержания общего и органического углерода, общего и аммонийного азота в отходах; линейные зависимости отношения $\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}}$ от зольности и константы скорости разложения отходов.

Метод термического анализа может заменить методы оценки стабильности отходов на этапах жизненного цикла полигона, установить параметры, позво-

Таблица 3. Граничные значения индикаторных показателей оценки стабильности отходов

Table 3. Boundary values of indicators of waste stability assessment

Параметр	Классы стабильности отходов					
	Высокореактивные отходы		Реактивные отходы		Стабильные отходы	
	Значение	Срок захоронения, лет	Значение	Срок захоронения, лет	Значение	Срок захоронения, лет
$\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}}$	>0,45	<10,0	0,2–0,45	10–35	<0,2	>35
$K_{c.p. (220-250^\circ C)}$	>0,017	<8,0	0,007–0,017	8–32	<0,007	>32
ХПК, мгО ₂ /л	>1400	<12,0	500–1400	12–30	<500	>30
БПК ₅ , мгО ₂ /л	>650	<10,0	180–650	10–27	<180	>27
НН ₄ -N, г/кг СВ	>6,1	<4,0	1,4–6,1	4–25	<1,4	>25
N _{общ.} , г/кг СВ	>7,6	<4,0	3,5–7,6	4–45	<3,5	>45
Зольность, %	<55	<5,0	55–80	5–30	>80	>30
C _{орг.} , г/кг СВ	>185	<3,0	95–185	3–35	<95	>35
C _{общ.} , г/кг СВ	>210	<4,0	120–210	4–35	<120	>35
RI ₄ , мгО ₂ /г СВ	>7,0	<8,0	2,0–7,0	8–35	<2,0	>35
GS ₂₁ , л/кг СВ	>20	<8,0	5,0–20	8–35	<5,0	>35

ляющие оценить воздействие полигона на окружающую среду. Предложено оценивать стабильность отходов в массиве полигона по ряду термических параметров отходов: величине тепловых эффектов, температуре пиков тепловыделения, скорости потери массы, отношению $\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}}$.

Установленные зависимости термических параметров отходов от их физико-химических и биохимических параметров отходов разного срока захоронения позволили установить классы стабильности отходов, граничные

значения индикаторных показателей стабильности и периоды их достижения (табл. 3). По классам стабильности отходы предложено разделить на высокореактивные, реактивные и стабильные.

Определено, что отходы, имеющие отношение $\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}}$ >0,45, относятся к классу высокореактивных, отходы с отношением $\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}}$ = 0,2÷0,45 относятся к классу реактивных отходов, отходы с отношением $\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}}$ <0,2 относятся к классу стабильных отходов.

Выводы

Установлены зависимости термических параметров отходов от их физико-химических и биохимических параметров на разных сроках захоронения, позволившие определить индикаторные показатели стабильности отходов. На этапах жизненного цикла объекта выявлены логистические зависимости отношения $\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}}$ от показателя дыхательной активности, потенциала газообразования отходов, ХПК, БПК₅; экспоненциальные зависимости отношения $\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}}$ от содержания общего и органического углерода, общего и аммонийного азота в отходах; линейные зависимости отношения $\frac{\text{Э(СВ)}}{\text{Э(ОСВ)}}$ от зольности и константы скорости разложения отходов.

Разработана методика комплексной оценки стабильности отходов разного срока захоронения с использованием метода СТА, предназначенная для геоэкологической оценки состояния полигонов захоронения ТКО на разных этапах жизненного цикла.

Полученные результаты оценки стабильности отходов могут быть использованы при разработке и выборе технических мероприятий для снижения негативного воздействия полигонов и свалок на объекты окружающей среды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научных проектов № С-26/623 и С-26/174.8.

Литература

1. Тупицына О.В., Чертес К.Л. Восстановление техногенно-нарушенных территорий: монография. Самара, Самарск. гос. тех. ун-т, 2011. 177 с.
2. Чертес К.Л., Савельев А.А., Мартыненко Е.Г., Тупицына О.В., Михасек А.А. Оценка состояния и освоение территорий Самарской области, занятых размещением твердых бытовых отходов. Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. № 1 (22). С. 49–57.
3. Суздалева А.Л. Создание управляемых природно-технических систем М., ООО ИД ЭНЕРГИЯ, 2016. 160 с.
4. Заиканов В.Г., Минакова Т.Б. Антропогенный фактор в геоэкологической оценке территорий. Геоэкология. Инженерная геоэкология. Гидрогеоэкология. Геокриология. 2014. № 3. С. 270–276.
5. Huber-Humer M., Roeder S., Lechner P. Approaches to assess biocover performance on landfills. Waste Management 29. 2009. P. 2092–2104.
6. Smidt E., Lechner P. Study on the degradation and stabilization of organic matter in waste by means of thermal analyses. Thermochimica Acta. 2005. 438. P. 22–28.
7. Пухнюк А.Ю., Матвеев Ю.Б., Хубер-Хумер М. Применение спектральных и термических методов анализа для эколого-энергетической оценки полигонов твердых бытовых отходов. Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2012. № 4. С. 49–59.
8. Cossu R., Lai T., Piovesan E. Proposal of a methodology for assessing the final storage quality of a landfill. Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, CISA. 2007. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/322070017_Proposal_of_a_methodology_for_assessing_the_final_storage_quality_of_a_landfill (дата обращения 12.04.2019).
9. Stegmann R., Heyer K.-U., Hupe K., Willand A. Deponienachsorge Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge. Dessau, Umweltbundesamt. March. 2006. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3128.pdf>. (дата обращения 10.03.2019).
10. Melis P., Castaldi P. Thermal analysis for the evaluation of the organic matter evolution during municipal solid waste aerobic composting process. Thermochimica Acta. 2004. 413. P. 209–214.
11. Zhu Y., Chai X., Li H., Zhao Y., Wei Y. Combination of combustion with pyrolysis for studying the stabilization process of sludge in landfill. Thermochimica Acta. 2007. 464. P. 59–64.
12. Smidt E., Meissl K., Tintner J. Investigation of 15-year-old Municipal Solid Waste Deposit Profiles by Means of FTIR Spectroscopy and Thermal Analysis. Journal of Environmental Monitoring, 2007. Vol. 9. Iss. 12. P. 1387–1393.
13. Армишева Г.Т. Рекуперация ресурсов при захоронении твердых бытовых отходов. Дисс. ... канд. техн. наук. Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2008. 179 с.
14. Завизон Ю.В., Слюсарь Н.Н., Глушанкова И.С., Загорская Ю.М., Коротаев В.Н. Оценка состояния полигонов захоронения ТБО по изменению органической составляющей. Экология и промышленность России. 2015. № 7. С. 26–31.
15. Завизон Ю.В. Оценка состояния полигонов захоронения твердых коммунальных отходов на этапах жизненного цикла термоаналитический и спектроскопический подход. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2016. № 3. С. 90–109.

References

1. Tupitsyna O.V., Chertes K.L. Vosstanovlenie tekhnogenno-narushennykh territorii: monografiya. Samara, Samarsk. gos. tekhn. un-t, 2011. 177 s.
2. Chertes K.L., Savel'ev A.A., Martynenko E.G., Tupitsyna O.V., Mikhasek A.A. Otsenka sostoyaniya i osvoenie territorii Samarskoi oblasti, zanyatykh razmeshcheniem tverdykh bytovykh otkhodov. Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo i arkhitektura. 2016. № 1 (22). S. 49–57.
3. Suzdaleva A.L. Sozdanie upravlyaemykh prirodno-tekhnicheskikh sistem M., OOO ID ENERGIYA, 2016. 160 s.
4. Zaikanov V.G., Minakova T.B. Antropogennyy faktor v geoeologicheskoi otsenke territorii. Geoeologiya. Inzhenernaya geoeologiya. Hidrogeoeologiya. Geokriologiya. 2014. № 3. S. 270–276.
5. Huber-Humer M., Roeder S., Lechner P. Approaches to assess biocover performance on landfills. Waste Management 29. 2009. P. 2092–2104.
6. Smidt E., Lechner P. Study on the degradation and stabilization of organic matter in waste by means of thermal analyses. Thermochimica Acta. 2005. 438. P. 22–28.
7. Pukhnyuk A.Yu., Matveev Yu.B., Khuber-Khumer M. Primenenie spektral'nykh i termicheskikh metodov analiza dlya ekologo-energeticheskoi otsenki poligonov tverdykh bytovykh otkhodov. Energotekhnologii i resursosberezhenie. 2012. № 4. S. 49–59.
8. Cossu R., Lai T., Piovesan E. Proposal of a methodology for assessing the final storage quality of a landfill. Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, CISA. 2007. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/322070017_Proposal_of_a_methodology_for_assessing_the_final_storage_quality_of_a_landfill (дата обращения 12.04.2019).
9. Stegmann R., Heyer K.-U., Hupe K., Willand A. Deponienachsorge Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge. Dessau, Umweltbundesamt. March. 2006. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3128.pdf>. (дата обращения 10.03.2019).
10. Melis P., Castaldi P. Thermal analysis for the evaluation of the organic matter evolution during municipal solid waste aerobic composting process. Thermochimica Acta. 2004. 413. P. 209–214.
11. Zhu Y., Chai X., Li H., Zhao Y., Wei Y. Combination of combustion with pyrolysis for studying the stabilization process of sludge in landfill. Thermochimica Acta. 2007. 464. P. 59–64.
12. Smidt E., Meissl K., Tintner J. Investigation of 15-year-old Municipal Solid Waste Deposit Profiles by Means of FTIR Spectroscopy and Thermal Analysis. Journal of Environmental Monitoring, 2007. Vol. 9. Iss. 12. P. 1387–1393.
13. Armisheva G.T. Rekuperatsiya resursov pri zakhoroneni tverdykh bytovykh otkhodov. Diss. ... kand. tekhn. nauk. Perm. gos. tekhn. un-t. Perm', 2008. 179 s.
14. Zavizion Yu.V., Slyusar' N.N., Glushankova I.S., Zagorskaya Yu.M., Korotaev V.N. Otsenka sostoyaniya poligonov zakhoroneniya TBO po izmeneniyu organicheskoi sostavlyayushchei. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2015. № 7. S. 26–31.
15. Zavizion Yu.V. Otsenka sostoyaniya poligonov zakhoroneniya tverdykh kommunal'nykh otkhodov na etapakh zhiznennogo tsikla termoanaliticheskii i spektroskopicheskii podkhod. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika. 2016. № 3. S. 90–109.

Ю.В. Завизон – ст. преподаватель, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614000 Россия, г. Пермь, Комсомольский пр. 29, e-mail: juliagubaha@mail.ru • Н.Н. Слюсарь – канд. техн. наук, доцент, e-mail: nnslyusar@gmail.com • В.Н. Коротаев – д-р техн. наук, профессор

Yu.V. Zavizion – Senior Lecturer, Perm National Research Polytechnic University, 614000 Russia, Perm, Komsomolsky Pr. 29, e-mail: juliagubaha@mail.ru • N.N. Slyusar – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, e-mail: nnslyusar@gmail.com • V.N. Korotaev – Dr. Sci. (Eng.), Professor