УДК 579.63: 549.291

ПЛАНИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ БИОУТИЛИЗАЦИИ РТУТИ ПРИ КОМПОСТИРОВАНИИ ТБО

¹Багдаткызы Н., ²Джамалова Г.А., ²Мусина У.Ш.

 1 Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, e-mail: naz_96b@bk.ru; ^{2}TOO «НДЦ AEG», Алматы

В статье описаны результаты, полученные при математическом планировании и оптимизации биодеградации ртути в процессе компостирования органических компонентов ТБО. Показано, что в окружающей среде ртуть может существовать преимущественно в виде нескольких взаимопревращающихся друг в друга химических форм: элементарной ртути (Hg(0), Hg(I), Hg(II)), двухвалентных неорганических солей и комплексов, и органических соединений метилртути и диметилртути. Анализ обобщенного уравнения показал, что при оптимальных условиях компостирования и при заданных технологических параметрах (обсемененность Thiobacillus ferrooxidans на пятом уровне разведения, добавление почвы в субстрат в количестве 20 г/кг, влажность 66%, температура 32°C, содержание органического компонента в ТБО 70%, продолжительность компостирования 120 дней) степень очистки компостной системы от ртути составит 96,51%. Установлено, что наиболее сильнодействующими факторами являются обсемененность Thiobacillus ferrooxidans, влажность и продолжительность компостирования.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, компостирование, ртуть, моделирование

PLANNING AND OPTIMIZATION OF BIOUTILIZATION OF MERCURY WHEN COMPOSTING MSW

¹Bagdatkyzy N., ²Jamalova G., ²Mussina U.

¹Kazakh National Technical University named after K.I. Satpaev, Almaty, e-mail: naz_96b@bk.ru; ²LLP «SDC AEG», Almaty

In article the results received at mathematical planning and optimization of biodegradation of mercury in the course of composting of the MSW organic components are described. It is shown that in the environment mercury can exist mainly in the form of several chemical forms which are mutually turning each other: elementary mercury (Hg(0), Hg(I), Hg(II)), bivalent inorganic salts and complexes, and organic compounds of methylmercury and dimethylmercury. The analysis of the generalized equation showed that under optimum conditions of composting and at the set technological parameters (Thiobacillusferrooxidans obsemenennost at the fifth level of cultivation, addition of the soil in a substratum in number of 20 g/kg, humidity of 66 %, temperature 32 °C, the maintenance of an organic component in MSW of 70 %, duration of composting of 120 days) extent of cleaning of compost system of mercury will make 96,51 %. It is established that the most strong factors are Thiobacillusferrooxidans obsemenennost, humidity and duration of composting

Keywords: solid municipal waste, composting, mercury, modeling

Вопрос утилизации ртути в компостируемой массе органических отходов актуален вследствие того, что, во-первых, он относится к веществам первого класса опасности (ТБО обогащается ртутью за счет ртутьсодержащих приборов: ртутные лампы, термометры, элементы питания) [1], во-вторых, миграционно активен в окружающей среде и, в-третьих, в процессе компостирования органических отходов, он «стремится» зафиксироваться в виде стойких ртутьорганических соединений [2].

В окружающей среде, как отмечено в работе UllrichS.M. (2001) [3], ртуть может существовать преимущественно в виде нескольких взаимопревращающихся друг в друга химических форм: элементарной ртути (Hg(0), Hg(I), Hg(II)), двухвалентных неорганических солей и комплексов, и органических соединений метилртути и диметилртути.

Цель. Планирование и оптимизация биоутилизации ртути при компостировании ТБО.

Работа основана на обработке данных, указанных в работах [4, 5] и основана на методике, описанной в работе [6]

При математическом планировании и оптимизации процессов биоутилизации ртути при аэробном биоразложении органических компонентов ТБО были приняты для исследования шесть факторов.

Согласно данным, полученным Ермаковым (2010) [7] установлено, что такие факторы, как высокое содержание органических веществ (с преобладанием гуминовых кислот), восстановительная среда (дефицит кислорода), низкое содержание сульфидов и железа, нейтральная или слабокислая среда способствуют процессам алкилирования ртути а на биодоступность ртути [8, 9] влияют такие экологические факторы,

как температура, рН, окислительно-восстановительный потенциал, доступность питательных веществ и акцепторов электронов, присутствие лигандов и адсорбирующих поверхностей.

Устойчивость бактерий к тяжелым металлам кодируется генами, чаще всего сосредоточенными в плазмидах, реже — в транспозонах и меньше всего — в хромосомах. Детально изучена и описана у бактерий структура и экспрессия генетических детерминант, обеспечивающих устойчивость к ртути. Acinetobactersp., Serratiamarcescens, Pseudomonasputrefaciens, P. stutzeri, Shigellasp. проявляли Нд-резистентность, обусловленную присутствием различных плазмид. Бактерии Pseudomonasaeruginosa характеризовались механизмом устойчивости, связанным с присутствием транс-

позонаТп501 ~ у Thiobacillus ferrooxidans и Bacillussp. гены Hg-резистентности выявлены в хромосомах [10].

Исходя из вышеизложенного, отобранные для исследования математическим методом факторы приведены в табл. 1.

На основе шестифакторной матрицы планирования эксперимента был проведен расчет опытных значений частных функций (табл. 2).

Выполнен анализ моделей для алгебраического описания функций методом наименьших квадратов. Расчет значений и апроксимация исследованных функций позволил составить выборку на точечные графики, указывающие на закономерности изменения степени очистки компостируемого субстрата от ртути с учетом принятых факторов (рисунок).

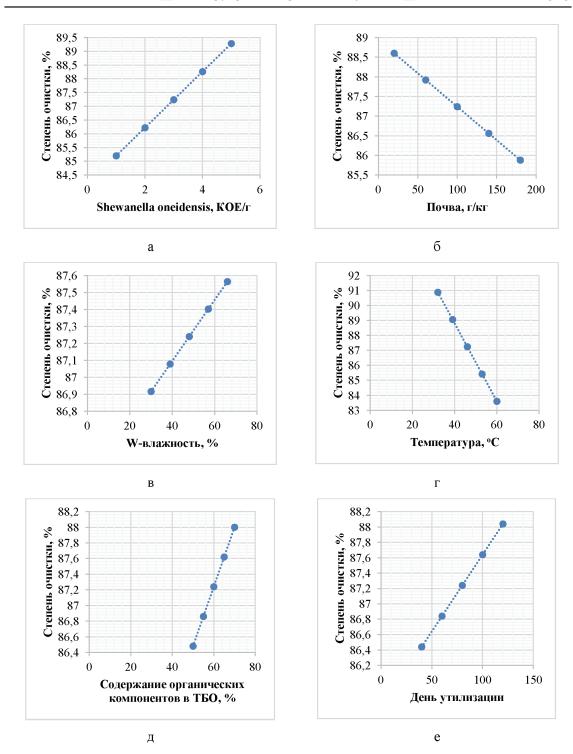
Таблица 1 Область факторного пространства

Фортону	Уровни факторов						
Факторы	1	2	3	4	5		
X ₁ – Thiobacillus ferrooxidans, KOE/Γ		2	3	4	5		
X_2 — Добавление почвы в компостируемый субстрат, г/кг	20	60	100	140	180		
Х ₃ – Влажность, %	30	39	48	57	66		
X_4 -Температура, $^{\circ}$ С	32	39	46	53	60		
X_{5} – Содержание органических компонентов в ТБО, %	50	55	60	65	70		
${ m X_6}$ – День биоутилизации	40	60	80	100	120		

 Таблица 2

 Расчет экспериментальных значений частных функций

No diarmone	Уровень					Среднее	
№ фактора	1	2	3	4	5	значение	
X ₁	88,2	82,2	88	86,8	91	87,24%	
Χ,	91,2	88,4	82	85,2	89,4		
X ₃	85,6	90,6	86	84,6	89,4		
X_4	89,2	87,2	93,2	85,8	80,8		
X ₅	86,4	88,2	86,2	86	89,4		
X_6	82,4	91,8	87	89,4	85,6		



Выборка на точечные графики: закономерности изменения степени очистки компоста от ртути с учетом обсемененности Thiobacillusferrooxidans (а), вводимого в компостируемый субстрат количества почвы (б), влажности (в), температуры (г), содержания органических компонентов (д), дня компостирования (е)

Как видно из рисунка:

- повышение обсемененности Thiobacillus ferrooxidans с первого по пятый уровень разведения приводит к повышению степени очистки компостируемого субстрата ТБО с 82,5% до 89,28% (следует обратить внимание, что изменения по проценту очистки компостируемого субстрата ТБО от ртути существенны, т.к. разница составляет 6,78%),
- повышение дозы вводимого в компостируемый субстрат почвы приводит к снижению степени очистки субстрата от ртути: при введении 20 г/кг степень очистки составляет 88,6%, тогда как при введении 180 г/кг всего 85,88%;
- с повышением влажности компостируемого субстрата с 30 до 66%, повышается и степень очистки субстрата от ртути с 86,95 до 87,56% (полученные сотые показатели процента очистки свидетельствуют о высокой чувствительности),
- повышение температуры с 32 до 60°C сопровождается для компостируемого субстрата понижением степени очистки субстрата от ртути от 90,88 до 83,6% (ртуть легко испаряется при низкой температуре, а при высоких образует стойкие органические соединения, которые представляют опасность для природной среды из-за высокой токсичности [11]),
- с увеличением в составе компостируемого субстрата органических веществ с 50 до 70%, повышается и степень очистки субстрата от ртути с 86,48 до 88%,
- высокий процент утилизация ртути положительно коррелирует с продолжительностью компостирования, т.е. чем дольше протекает процесс компостирования (с 40-го дня по 120-й день), тем выше процент очистки с 86,44 до 88,04%.

$$Y_{\text{of}} = \frac{Y_{11} \cdot Y \cdot \dots Y_n}{Y_{\text{cp}}^{n-1}} =$$

$$=\frac{89,2888,687,56490,888888,04}{87,24^{6+}}=96,51.$$

Анализ обобщенного уравнения показал, что при оптимальных условиях компостирования и при заданных технологических параметрах (обсемененность *Thiobacillus ferrooxidans* на пятом уровне разведения, добавление почвы в субстрат в количестве 20 г/кг, влажность 66%, температура 32°С, содержание органического компонента в ТБО

70%, продолжительность компостирования 120 дней) степень очистки компостной системы от ртути составит 96,51%.

Выводы:

- 1. Методом моделирования на основе множественной корреляции изучено влияние независимых переменных на степень очистки компоста от ртути в процессе аэробного биоразложения органических компонентов ТБО.
- 2. Установлено, что наиболее сильнодействующими факторами являются обсемененность *Thiobacillus ferrooxidans*, влажность и продолжительность компостирования.
- 3. Наибольший процент очистки компоста от ртути происходит при заданных изменениях исследуемых факторов в пределах 86,48 90,88%.

Список литературы

- 1. Водяницкий Ю.Н. Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах // Почвоведение. 2012. № 3. C. 368–375.
- 2. Виноградов В.Н., Милков Г.В., Лашков Б.П. Пары ртути в помещениях. СПб., 1991. 14 с.
- 3. Ullrich S.M., Tantona T.W., Abdrashitova S.A. Mercury in the Aquatic Environment: A Review of Factors Affecting Methylation / Critical Reviews in Environmental Science and Technology, Volume 31, Issue 3, 2001.
- 4. Гарабаджиу А.В., Джамалова Г.А., Свирко Е.А., Джолдыбаева С.М. Изменчивость ксенобиотической активности и микробиоценоза в компостируемом композите «твердые бытовые отходы + почва» // Известия СПбГТИ(ТУ). 2016. № 33 (59). С. 71–76.
- 5. Гарабаджиу А.В., Джамалова Г.А., Джолдыбаева С.М., Свирко Е.А. Изменчивость ксенобиотиче-ской активности и микробио-ценоза в компостируемом композите «твердые бытовые отходы» // Современные проблемы науки и образования. 2016. № 3.; URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=24633.
- 6. Джамалова Г.А. Математическое планирование выхода продуктов биоразложения твердых бытовых отходов в зависимости от протокола загрузки биореактора // Современные проблемы науки и образования. −2015. № 4.; URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21293 (дата обращения: 23.02.2018).
- 7. Ермаков В.В. Биогенная миграция и детоксикация ртути / В сборнике: Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты. Материалы Международного симпозиума (Москва, 7–9 сентября 2010 г.). М.: ГЕО-ХИ РАН, 2010. С. 10.
- 8. Luengen A., Fisher N.S., Bergamaschi B.A. Dissolved organic matter reduces algal accumulation of methylmercury / Environmental Toxicology and Chemistry, Volume 31, Issue 8, August 2012, pp. 1712–1719.
- 9. Zheng W., Liang L., Gu B. Mercury Reduction and Oxidation by Reduced Natural Organic Matter in Anoxic Environments / Environ. Sci. Technol., 2012, 46 (1), pp 292–299.
- 10. Cervantes C, Silver S. Metal resistances in Pseudomonads: Genes and Mechanisms // Molecular Biology of Pseudomonads Ed. by T.Nakazawaet. al. Washington: ASM Press. 1996. P. 398–415.
- 1. 11. Давыдова С.Л., Тагасов В.И. 13 Тяжелые металлы как супертоксиканты XXI века: Учеб. пособие. М.: Изд-во РУДН, 2002. 140 с.