

4. Найманов А.Я., Никиша С.Б. Антинакипные энергетические аппараты в оборотном водоснабжении // Водоснабжение и санитарная техника, 1984. — № 2. — С. 22–23.
5. Найманов А.Я., Найманова А.А. О механизме воздействия электрообработки воды на накипеобразование в теплообменниках. // Теплоэнергетика, 1998. — № 7. — С. 59–61.
6. Найманов А.Я., Никиша С.Б. Исследование работы антинакипного электрического аппарата. // Промышленная энергетика, 1983. — № 11. — С. 43–45.
7. Алекин О.А. Основы гидрохимии. — Л.: Гидрометеоиздат, 1970. — 92 с.
8. Яковлев С.В., Краснобородько И.Г., Рогов В.М. Технология электрохимической очистки воды. — Л.: Стройиздат, 1987. — 312 с.

О Мальцев В.А., Николаев Н.Н., Янковская Э.В., 2006

УДК 628.4

Краснянский М.Е., Бельгасем А. (ДонНТУ), Макарова Е.Н., Сбоева А.Н. (ДонгорСЭС)

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РОЛИ МИКРООРГАНИЗМОВ В БИОДЕГРАДАЦИИ ТБО

*Проведены качественные и количественные исследования микроорганизмов в ТБО. Разработана теоретическая модель развития колонии микроорганизмов (МАФМ). Проведены экспериментальные исследования эмиссии «свалочного» газа на «лабораторной свалке» ТБО.*

В теле полигонов твёрдых бытовых отходов (ТБО) имеют место три последовательные реакции:



В процессе биodeградации микроорганизмами разрушаются, прежде всего, С-С связи, в результате чего образуются высокоактивные радикалы типа  $CH_3$ , которые способны участвовать в высокоэкзотермических реакциях (т.е. с выделением большого количества тепла):



Известно [1], что в процессе биоразложения ТБО участвуют два основных типа бактерий: аэробные (в верхнем слое ТБО, где достаточно кислорода) и анаэробные (в глубинных слоях ТБО, где существует дефицит кислорода). Кроме того, в данном процессе ограничено участвуют плесневые грибы.

Для исследований мы создали искусственную «микросвалку ТБО». В стеклянный сосуд диаметром 15 см закладывали слой ТБО толщиной 10 см: 180 г сухих ТБО (табл. 1) + 20 г «затравки» из бактерий и грибов + 100 мл воды для создания «естественной» влажности ТБО около 30%. Слой ТБО сверху присыпали слоем земли до 2 см. Сосуд закрывали негерметичной полиэтиленовой крышкой, при этом над слоем земли (до крышки) оставался воздушный слой в 20 см.

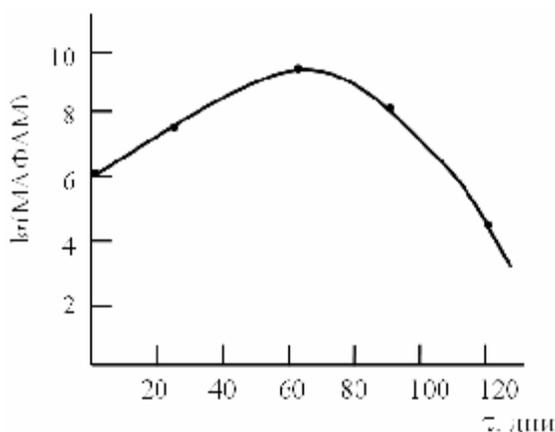
Качественные исследования, проведенные нами, показали наличие в «искусственной свалке ТБО» следующих микроорганизмов: *Pseudomonas* (аэробные бактерии, которые извлекают из органической массы ТБО углерод, образуя  $CO_2$ ); *Azotobacter* (аэробные бактерии, которые извлекают из

органической массы ТБО азот); *Bacillus* (аэробные бактерии, которые разлагают белок с выделением аммиака); *Clostridium* (анаэробные бактерии, которые разлагают целлюлозу до кислот — уксусной, масляной и др.); *Methanococcus* (анаэробные бактерии, которые катализируют восстановление  $\text{CO}_2$  водородом до метана) и некоторые другие.

**Таблица 1.** Средний компонентный состав полигонов ТБО г. Донецка

Компоненты	мас. %
Пищевые отходы	26
Бумажные отходы	14
Дерево, ветки, листья	10
Металл	4
Текстиль	3
Стекло	9
Пластмасса, кожа, резина	11
Камни	3
Отсев*	20
*) Около 1/3 отсева имеет органическую природу	

Количественные измерения были проведены нами только для «суммарного» состава микроорганизмов (так называемый «МАФAM» — мезофильные аэробные и факультативно анаэробные микроорганизмы). Подсчет проводился по следующей методике: пробу ТБО высевали в мясо-пептонный агар и выдерживали при температуре  $37^\circ\text{C}$  в течение 24 час.



**Рис. 1.** Динамика изменения численности колонии микроорганизмов.

После инкубации подсчитывали (с помощью микроскопа) выросшие колонии в пересчете на 1 г сухих ТБО (так называемые КОЕ-колонии образующихся единиц).

Как следует из рис. 1, развитие колонии микроорганизмов в толще ТБО проходит через максимум, который приходится на 1/3 - 1/2 срока биодegradации свалки ТБО. Если проектный срок работы свалки 30 лет, то максимум эмиссии биогаза будет иметь место через 10 - 15 лет.

Для теоретического изучения динамики изменения численности колонии микроорганизмов в теле полигона нами была создана математическая модель, описываемая следующей системой уравнений:

$$dN/dt = \beta N - \gamma NR;$$

$$dR/dt = \lambda N,$$

где  $N(t)$  — число активных микроорганизмов в ТБО;  $R(t)$  — фактор «обратного катализа» т.е. сумма всех факторов, замедляющих или прекращающих рост колонии бактерий: отравление продуктами жизнедеятельности микроорганизмов, уменьшение количества пищи и др.;  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$  — константы, которые определяются по данным экспериментальных исследований размножения микробных клеток  $N(t)$ .

Решая систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{dN}{d\tau} = \beta N - \gamma NR \\ \frac{dR}{d\tau} = \lambda N \end{cases},$$

из первого уравнения получаем

$$R = \frac{\beta N - \frac{dN}{d\tau}}{\gamma N} = \frac{1}{\gamma} \left( \beta - \frac{1}{N} \frac{dN}{d\tau} \right). \quad (1)$$

Дифференцируя (1) и подставляя результат в левую часть второго уравнения исходной системы, имеем

$$\frac{1}{N^2} \left( \frac{dN}{d\tau} \right)^2 - \frac{1}{N} \frac{d^2 N}{d\tau^2} = \gamma \lambda N,$$

или

$$\frac{d^2 N}{d\tau^2} - \frac{1}{N} \left( \frac{dN}{d\tau} \right)^2 = -\gamma \lambda N^2. \quad (2)$$

Делаем замену:

$$\frac{dN}{d\tau} = p; \quad \frac{d^2 N}{d\tau^2} = p \frac{dp}{dN} \quad (3)$$

и после подстановки (3) в (2) получаем уравнение Бернулли

$$p \frac{dp}{dN} - \frac{1}{N} p^2 = -\gamma \lambda N^2. \quad (4)$$

В результате очередной замены

$$z = p^2 \frac{dz}{dN} = 2p \frac{dp}{dN} \quad (5)$$

уравнение (4) преобразуется в линейное уравнение

$$\frac{1}{2} \frac{dz}{dN} - \frac{1}{N} z = -\gamma \lambda N^2,$$

или

$$\frac{dz}{dN} - 2 \frac{1}{N} z = -2\gamma \lambda N^2. \quad (6)$$

Решаем однородное уравнение

$$\frac{dz}{dN} - 2 \frac{1}{N} z = 0, \quad (7)$$

разделяем переменные

$$\frac{1}{z} dz = 2 \frac{1}{N} dN, \quad (8)$$

и интегрируем

$$\ln|z| = 2 \ln|N| + \ln|\tilde{C}|, \quad (9)$$

где  $\tilde{C}$  — константа интегрирования.

Из (9) следует 
$$z = \tilde{C} \cdot N^2. \tag{10}$$

Считая  $\tilde{C} = \tilde{C}(\tau)$ , подставим (10) в (6), тогда

$$\frac{d\tilde{C}}{dN} N^2 + 2\tilde{C}N - 2\frac{1}{N}\tilde{C}N^2 = -2\gamma\lambda N^2, \tag{11}$$

откуда 
$$\frac{d\tilde{C}}{dN} = -2\gamma\lambda \quad \text{и} \quad \tilde{C} = C^2 - 2\gamma\lambda N, \tag{12}$$

где  $C^2$  — константа интегрирования.

Подставим (12) в (10), тогда

$$z = N^2(C^2 - 2\gamma\lambda N), \tag{13}$$

а с учетом (5) и (3): 
$$\frac{dN}{d\tau} = N\sqrt{C^2 - 2\gamma\lambda N}. \tag{14}$$

В уравнении (14) производим замену

$$\sqrt{C^2 - 2\gamma\lambda N} = t. \tag{15}$$

Получаем 
$$N = \frac{C^2 - t^2}{2\gamma\lambda}; \quad \frac{dN}{d\tau} = -\frac{t}{\gamma\lambda} \frac{dt}{d\tau}, \tag{16}$$

и после подстановки (16) в (14) имеем

$$-\frac{t}{\gamma\lambda} \frac{dt}{d\tau} = \frac{C^2 - t^2}{2\gamma\lambda} t, \tag{17}$$

отсюда 
$$\frac{dt}{t^2 - C^2} = \frac{1}{2} d\tau, \tag{18}$$

и после интегрирования обеих частей (18) получаем

$$\frac{1}{2C} \ln \left| \frac{t-C}{t+C} \right| = \frac{1}{2} \tau + C_1, \tag{19}$$

где  $C_1$  — константа интегрирования.

Потенцируем (19), тогда 
$$\frac{t-C}{t+C} = \bar{C} e^{C\tau}, \tag{20}$$

где  $\bar{C} = e^{2C \cdot C_1}$ .

Решением (20) является 
$$t = \frac{C(1 + \bar{C}e^{C\tau})}{1 - \bar{C}e^{C\tau}}, \quad (21)$$

следовательно, в соответствии с (16)

$$N = -2 \frac{C^2}{\gamma\lambda} \frac{\bar{C}e^{C\tau}}{(1 - \bar{C}e^{C\tau})^2}. \quad (22)$$

Это и есть искомое решение.

Из (14) следует, что функция  $N$  ограничена и имеет максимальное значение  $N_m$  при  $\tau = \tau_m$  только в частном случае, а именно при

$$\gamma\lambda = \frac{1}{2N_m} C^2. \quad (23)$$

В этом случае в соответствии с (22)

$$N = -4N_m \frac{\bar{C}e^{\bar{C}\tau}}{(1 - \bar{C}e^{\bar{C}\tau})^2}, \quad (24)$$

По начальному условию и известному значению функции в точке максимума составляем систему уравнений относительно констант  $C$  и  $\bar{C}$

$$N_0 = -4N_m \frac{\bar{C}}{(1 - \bar{C})^2}; \quad N_m = -4N_m \frac{\bar{C}e^{C\tau_m}}{(1 - \bar{C}e^{C\tau_m})^2}. \quad (25)$$

Из первого уравнения следует:

$$\bar{C}^2 - 2(1 - 2\frac{N_m}{N_0})\bar{C} + 1 = 0. \quad (26)$$

Физический смысл имеет корень данного квадратного уравнения:

$$\bar{C} = -2 \left[ \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{N_0}{N_m}} \right) \frac{N_m}{N_0} - \frac{1}{2} \right]. \quad (27)$$

Если принять 
$$C = -\frac{1}{\tau_m} \ln(k\bar{C}) \quad (28)$$

и подставить (28) во второе уравнение системы (25), получаем, что  $k = -1$ .

В итоге 
$$N = 4N_m \frac{\Delta^{1 - \frac{\tau}{\tau_m}}}{\left( \Delta^{1 - \frac{\tau}{\tau_m}} + 1 \right)^2}. \quad (29)$$

где  $\Delta = -\bar{C}$ .

Результаты численного расчета свидетельствуют, что с возрастанием времени  $\tau$  количество микробных организмов в биомассе возрастает и на момент времени  $\tau = 4$  час достигает максимального значения, которое при дальнейшем увеличении  $\tau$  (свыше 14 час) асимптотически уменьшается до нуля (рис.2).

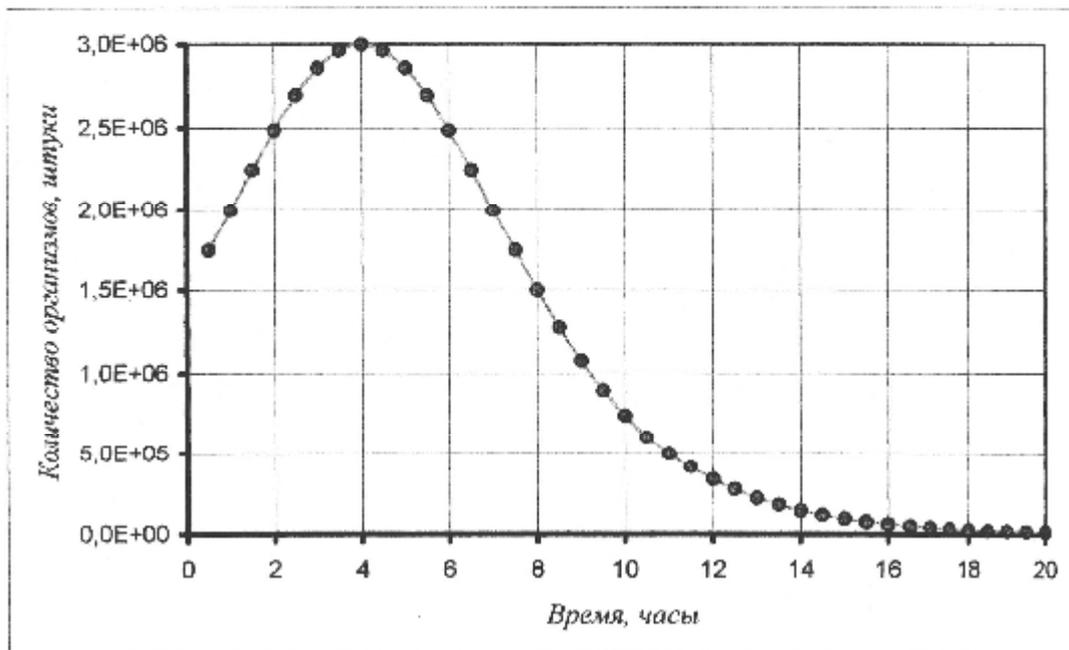


Рис. 2. Теоретическая кривая для численности МАФАМ.

Такое поведение функции  $N(\tau)$  обосновывается тем, что на промежутке от 0 до 4 час скорость размножения микроорганизмов преобладает над скоростью их самоуничтожения, а в промежутке 4–14 час — наоборот.

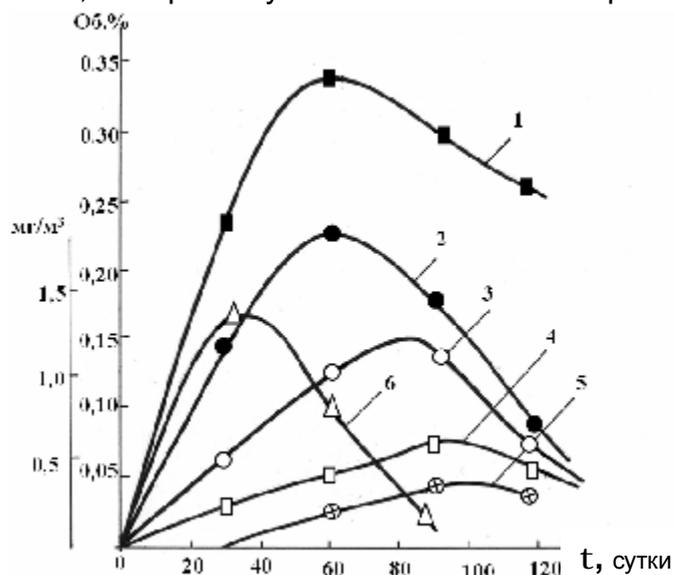


Рис. 3. Динамика эмиссии токсичных и «парниковых» газов из тела «лабораторной свалки» ТБО:

1 — диоксид углерода (об.%); 2 — метан (об.%); 3 — аммиак (мг/м<sup>3</sup>); 4 — сероводород (мг/м<sup>3</sup>); 5 — хлористый водород (мг/м<sup>3</sup>); 6 — формальдегид (мг/м<sup>3</sup>).

Для экспериментальной проверки динамики газовой выделенности из «лабораторной» свалки ТБО нами проведен анализ газовых проб внутри

стеклянного сосуда над слоем ТБО. Анализ газовых проб выполнялся с помощью хроматографа «Модель-3700» (колонка длиной 2 м и диаметром 3 мм, молекулярные сита) а также фотокolorиметра ФЭК-56М.

Как видно из рис. 3, эмиссия газов из ТБО, обусловленная их биодegradацией, имеет сходный характер и проходит через максимум, что хорошо коррелирует с рис. 1 и 2.

Это означает, что и на реальных полигонах ТБО максимальная эмиссия биогаза со всей площади полигона (а это миллионы кубометров в год!) будет иметь место в период от первой трети до половины полного срока его эксплуатации.

### Литература

1. **Gendebien A. and others.** Landfill gas. — Commission of the European Communities. — Brussels, 1992. — 865 p.

*О Краснянский М.Е., Бельгасем А., Макарова Е.Н., Сбоева А.Н., 2006*

УДК 621.794.42:546.56

**Хоботова Э.Б., Ларин В.И., Добриян М.А., Голик Е.В., Даценко В.В.**  
(Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина)

### РЕШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТРАВЛЕНИЯ МЕДИ

*Разработан малоотходный ресурсосберегающий способ регенерации отработанных растворов травления меди. Оптимизированы параметры протекания всех его стадий. Показаны преимущества данного технологического цикла травление-регенерация. Результаты работы могут быть использованы на практике в цехах изготовления плат печатного монтажа.*

Отсутствие простых и экономичных способов регенерации сточных вод объясняет однократное использование многих технологических растворов и последующий их сброс. Данная проблема касается и участков травления меди при изготовлении плат печатного монтажа [1]. При травлении меди широко используются растворы на основе хлорида железа(III) [1,2], которые по мере насыщения медью становятся непригодными и требуют замены. Создание циклических безотходных участков травления и регенерации позволит решить ряд экологических проблем, стабилизировать процесс травления, повысить его производительность. На практике используют как химические, так и электрохимические способы регенерации [3–8], позволяющие выделять медь из раствора в порошкообразной или пластинчатой форме, в которой она может быть использована в промышленности.

Работа выполнена в рамках государственной программы охраны окружающей среды — 4-ое направление научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Украины.

Целью работы являлось решение экологических проблем участков травления меди, в частности, снижение количества токсичных медьсодержащих вод. Решение этой проблемы связано с разработкой способа регенерации отработанных травильных растворов (ОТР) и оптимизацией параметров всех его стадий.