

С. Н. Костарев, Т. Г. Середя, Р. А. Файзрахманов
(Пермь, ПГТУ). **Модель процесса биодеструкции отходов на полигоне депонирования.**

Гидрохимический процесс на полигоне твердых бытовых отходов (ТБО) описан посредством многофазной модели биохимических реакций, в основу которой положен закон неразрывности потока с учетом диффузионного влияния [1]

$$\frac{\partial(\omega(\mathbf{x}, t)\beta_i(\mathbf{x}, t))}{\partial t} - \nabla \left(D(x, t)\nabla\beta_i(\mathbf{x}, t) - q(\mathbf{x}, t)\beta_i(\mathbf{x}, t) \right) = \omega(\mathbf{x}, t) \sum_{j=1}^{N_R} \gamma_{ij} R_j,$$

где $t \in (0, T)$ есть временная переменная; $\mathbf{x} \in \Omega$ есть пространственная переменная; $\omega(\mathbf{x}, t)$ — влажность массива; $\beta_i(\mathbf{x}, t)$ — концентрация вещества i -й стадии реакции; $D(\mathbf{x}, t)$ — диффузионно-фильтрационный тензор; $q(\mathbf{x}, t)$ — функция Дарси; γ_{ij} — стехиометрический коэффициент при компоненте скорости реакции R_j в i -й стадии реакции ($\gamma_{ij} < 0$ для исходных веществ реакции, $\gamma_{ij} > 0$ для продуктов реакции).

Процесс биодеструкции ТБО на полигоне протекает за счет гидролиза, осаднения, растворения с участием живого вещества. Процесс обработки рециркулируемого фильтрата гидроксидом кальция $Ca(OH)_2$ описан комплексом уравнений, включающим в себя $N_E = 4$ химических элемента, $N_R = 4$ независимых реакций и $N_S = 4$ соединения, формализованном стехиометрической формой матрицы, используемой в дальнейшем для расчета материально-энергетического баланса в массиве отходов [2]. Стехиометрическая матрица показывает, что при рециркуляции фильтрата, обработанного $Ca(OH)_2$ в массиве отходов, устанавливаются восстановительные (более безопасные) процессы. Биохимические процессы описаны кинетическими и равновесными реакциями с учетом влияния pH , температуры, влажности массива отходов и скорости роста биомассы по уравнениям Моно [3].

В общем виде протекание химико-биологических реакций в массиве ТБО может быть представлено в виде $\sum_{i=1}^{N_S} \gamma_{ij} X_i = 0$, где γ_{ij} ($i \in \{1, 2, \dots, N_S\}$, $j \in \{1, 2, \dots, N_R\}$) — стехиометрический коэффициент при компоненте X_i .

С учетом констант прямых k_r^f и обратных реакций k_r^b скорость элементарной кинетической реакции R_r описана уравнением [4]

$$R_r = \left(k_r^b \prod_{\{i|v_{ir}<0\}} \beta_i^{-v_{ir}} - k_r^f \prod_{\{i|v_{ir}>0\}} \beta_i^{v_{ir}} \right). \quad (1)$$

Первое слагаемое относится к продуктам реакции, второе — к реагентам, β_i — концентрация компонентов в строках матрицы.

Дифференциальная форма уравнения (1) в частных производных для кинетических реакций запишется в виде

$$\frac{\partial R_r}{\partial \beta_j} = -k_r^f V_{ir} \beta_j^{(v_{ir}-1)} \prod_{j \neq k} \beta_k^{v_{kr}}, \quad \text{если } v_{ir} > 0 \quad (\text{реагент}),$$

и

(2)

$$\frac{\partial R_r}{\partial \beta_j} = -k_r^b V_{ir} \beta_j^{(-v_{ir}-1)} \prod_{j \neq k} \beta_k^{-v_{kr}}, \quad \text{если } v_{ir} < 0 \quad (\text{продукт реакции}),$$

где β_j — концентрация элемента в столбиках матрицы обратимых реакций. Таким образом, $\partial R_r / \partial c_j \rightarrow \pm \infty$ для $|v_{ir}| < 1 \wedge \beta_j \rightarrow 0$.

Решение (2) приводит к четырем случаям частных $\partial R_i / \partial \beta_j$ производных с конечными пределами для $\beta_j \rightarrow 0$:

- 1) $-k_r^f v_{jr} \beta_j^{(v_{jr}-1)} \prod_{k \in M_1, k \neq j} \beta_k^{v_{kr}} \prod_{k \in M_2} \tilde{\beta}^{v_{kr}} (\beta_k / \tilde{\beta}), j \in M_1;$
- 2) $-k_r^f \tilde{\beta}_j^{v_{jr}} \frac{1}{\tilde{\beta}} \prod_{k \in M_1} \beta_k^{v_{kr}} \prod_{k \in M_2, k \neq j} \tilde{\beta}^{v_{kr}} (\beta_k / \tilde{\beta}), j \in M_2;$
- 3) $-k_r^b v_{jr} \beta_j^{(-v_{jr}-1)} \prod_{k \in M_3, k \neq j} \beta_k^{-v_{kr}} \prod_{k \in M_4} \tilde{\beta}^{-v_{kr}} (\beta_k / \tilde{\beta}), j \in M_3;$
- 4) $-k_r^b \tilde{\beta}_j^{-v_{jr}} \tilde{\beta}^{-1} \prod_{k \in M_3} \beta_k^{-v_{kr}} \prod_{k \in M_4, k \neq j} \tilde{\beta}^{-v_{kr}} (\beta_k / \tilde{\beta}), j \in M_4.$

Решение системы уравнений получено методами вариационного исчисления с применением метода конечных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вавилин В. А., Гусев Е. М.* Имитационная модель биодеградации твердых отходов на свалке. — В сб.: 3-й Международный конгресс по управлению отходами «Вайстек». М.: 2003, с. 257–258.
2. *Костарев С. Н.* Системный анализ и моделирование процессов в природно-технических системах утилизации отходов. Пермь: Изд-во Пермского гос. техн. ун-та, 2009, 168 с.
3. *Кафаров В. В., Винаров А. Ю., Гордеев Л. С.* Моделирование биохимических реакторов. М.: Лесная промышленность, 1979, 344 с.
4. *Царева З. М., Товажнянский Л. Л., Орлова Е. И.* Основы теории химических реакторов (компьютерный курс). Харьков: ХГПУ, 1997, 624 с.