
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ПРОЦЕССОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ГАЗОВ ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ И ПЕРЕВОЗКЕ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

А.Г. Хайдаров, кандидат технических наук, доцент.

**Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет).**

Л.А. Королева, кандидат технических наук, доцент.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Выполнено моделирование кинетики биопроцессов, происходящих при разложении твердых бытовых отходов при их транспортировке и захоронении. Рассмотрена пожаровзрывоопасность отходов. Получены зависимости изменений концентрации биомассы, выработки биогаза от времени при анаэробном и аэробном процессе. Проведена оценка чувствительности констант скоростей на ход протекания реакций разложения отходов.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, пожаровзрывоопасность, биогаз, анаэробное и аэробное разложение, биомасса, чувствительность

MODELING OF PROCESSES OF FORMATION GASES FIRE AND EXPLOSION HAZARD IN THE DISPOSAL AND TRANSPORTATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE

A.G. Haydarov. Saint-Petersburg state institute of technology (technical university).

L.A. Koroleva. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The modeling of the kinetics of the processes occurring in the decomposition of municipal solid waste during their transportation and disposal. The fire and explosion hazard of waste is considered. The fire and explosion hazard of waste is considered. The dependences of changes in biomass concentration, biogas production on time in the anaerobic and aerobic process were obtained. The assessment of sensitivity of the rate constants on the course of a reaction the decomposition of waste.

Keywords: municipal solid waste, fire and explosion hazard, biogas, anaerobic and aerobic decomposition, biomass, sensitivity

Постоянное увеличение населения Земли приводит к возрастанию воздействия на окружающую среду, в том числе вследствие образования большого количества отходов. Рост объема твердых коммунальных отходов (ТКО) обусловлен как ростом населения, так и увеличением объема отходов, приходящихся на одного человека. По данным зарубежных исследователей, в 1960 г. объем отходов на душу населения составлял приблизительно 1,2 кг, в 2012 г. – 2,97 кг.

Несмотря на огромные площади, которыми располагает Россия, бесконтрольный рост нелегальных свалок и приближение официальных свалок ТКО к населённым пунктам приводят к ухудшению экологической обстановки, возникновению пожаров и чрезвычайных ситуаций. Примерно пятая часть отходов, образующихся в нашей стране, приходится на столичный регион.

В настоящее время 85 % московского мусора захоранивается на полигонах, 14,5 % перерабатывается на мусоросжигательных заводах, 0,5 % выделяются при сортировке и как вторичное сырьё используется при дальнейшей переработке.

Действующие мусорные полигоны вокруг столицы и других городов перегружены. На них регулярно возникают пожары [1]. Например, в ноябре 2011 г. произошел пожар на полигоне ТКО в Ленинградской области на Волхонском шоссе. В июне 2013 г. – на городской свалке в г. Челябинске, в мае 2018 г. – на территории закрытого полигона ТКО «Сьяново-1» Серпуховского района, в июне 2018 г. – на мусорном полигоне «Непейно» в Дмитровском районе Московской области [2].

Увеличение количества отходов определяет необходимость поиска эффективных путей утилизации и снижения их опасности для человека и окружающей среды.

На сегодняшний день прорабатывается проект по вывозу мусора из Москвы и Санкт-Петербурга по железной дороге. На узловых грузовых станциях будут размещены мусоросортировочные комплексы, куда будут свозиться отходы, прессоваться и в вагонах вывозиться в другие регионы. Потенциальный объем вывоза отходов составляет до 3 млн т из Москвы и до 2 млн т из Санкт-Петербурга.

Фактором негативного влияния отходов на окружающую среду и человека является их пожаровзрывоопасность. Биохимическое разложение отходов повышает их температуру, что активизирует процессы химического окисления и ведет к дальнейшему повышению температуры за счет протекания экзотермических процессов. Кроме того, в процессе биodeградации органоенов твердых бытовых отходов (ТБО) ассоциациями микроорганизмов образуется биогаз, состоящий из метана 50–65 % об. и диоксида углерода [3]. Состав биогаза зависит от длительности хранения отходов.

Горючесть и взрывоопасность биогаза в первую очередь определяется содержанием в нем метана. Метан в смеси с воздухом воспламеняется в пределах 5,28–14,1 % об. [4]. Взрыву препятствуют некоторые компоненты биогаза, такие как азот и двуокись углерода. При наличии нескольких горючих компонентов, например, метана и водорода, вероятность взрыва может увеличиваться.

Причинами возникновения трудноликвидируемых пожаров при обращении отходов могут быть самовозгорание отходов, несанкционированные противоправные действия, неосторожное обращение с огнем, инциденты на прилегающих территориях, неправильные действия персонала, климатические и природные воздействия. Горение сопровождается выделением в атмосферу значительного количества токсичных веществ, например, оксидов углерода, серы, азота, полициклических углеводородов.

Авторами выполнено моделирование кинетики биопроцессов, происходящих при разложении ТБО в процессе их перевозки и захоронения. В основу расчетов положена модель Моно. Вычисления производились по методике, предложенной в работе [4]. Рассматривали аэробное и анаэробное разложение отходов. Исходили из предположения, что концентрация субстрата высокая ($S \gg k_{S,N}$).

Скорость выработки анаэробной биомассы R_N [кг/м³/день] рассчитывали по уравнению:

$$R_N = \frac{\partial X_N}{\partial t} = k_{m,N} k_{temp,N} X_N - R_{D,N}, \quad (1)$$

где X_N – концентрация анаэробной биомассы [кг/м³]; $k_{m,N}$ – максимальная константа скорости анаэробного биораспада [день⁻¹]; $k_{temp,N}$ – коррекционный фактор температуры для анаэробной биомассы; S – доступный субстрат [кг/м³]; $k_{S,N}$ – константа полунасыщения

субстрата для анаэробного роста [кг/м³]; $R_{D,N}$ – скорость разложения анаэробной биомассы [кг/м³/день].

Скорость выработки аэробной биомассы R_A [кг/м³/день] представлена уравнением:

$$R_A = \frac{\partial X_A}{\partial t} = k_{m,A} k_{temp,A} \frac{c_{O_2}}{k_{O_2} + c_{O_2}} X_A - R_{D,A}, \quad (2)$$

где X_A – концентрация аэробной биомассы [кг/м³]; $k_{m,A}$ – максимальная константа скорости аэробного биораспада [день⁻¹]; $k_{temp,A}$ – коррекционный фактор температуры для аэробной биомассы; $k_{s,A}$ – константа полунасыщения субстрата для аэробного роста [кг/м³]; c_{O_2} – массовая концентрация кислорода [кг/м³]; k_{O_2} – константа полунасыщения кислорода [кг/м³]; $R_{D,A}$ – скорость разложения аэробной биомассы [кг/м³/день].

Скорость разложения аэробной и анаэробной биомассы равна:

$$R_{D,N} = 0,05k_{m,N}(X_N - X_{N,0});$$

$$R_{D,A} = 0,05k_{m,A}(X_A - X_{A,0}),$$

где $X_{N,0}$ и $X_{A,0}$ – начальные концентрации анаэробной и аэробной биомассы соответственно, [кг/м³].

Когда анаэробные бактерии подвергаются воздействию кислорода, роста не наблюдается и уравнение (1) принимает следующий вид:

$$R_N = -0,05k_{m,N}(X_N - X_{N,0}).$$

Когда аэробным бактериям хватает кислорода в анаэробной стадии свалки, роста не наблюдается и уравнение (2) принимает следующий вид:

$$R_A = -0,05k_{m,A}(X_A - X_{A,0}).$$

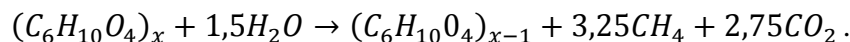
Коррекционный фактор температуры, входящий в биокинетические уравнения для анаэробного (1) и аэробного распада (2) определяли по формуле:

$$k_{temp} = \frac{(T - T_{max})(T - T_{min})^2}{(T_{opt} - T_{min})[(T_{opt} - T_{min})(T - T_{opt}) - (T_{opt} - T_{max})(T_{opt} + T_{min} - 2T)]},$$

где T – температура ТБО [К]; T_{max} – максимальная температура для микробного роста [К]; T_{min} – минимальная температура для микробного роста [К]; T_{opt} – оптимальная температура для микробного роста [К].

Температуры при расчете коррекционного фактора определены в работе [4].

В данной модели для оценки скорости выработки метана и углекислого газа совместно с уравнением (1) использовалась следующая биохимическая реакция анаэробного распада:



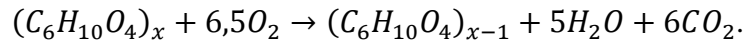
Получаемый газ производится только по мере роста анаэробных бактерий, поэтому время распада не учитывается:

$$\frac{R_{CO_2}}{2,75 \frac{M_{CO_2}}{M_{MSW}}} = \frac{R_N}{Y_{S/B,N}} = \frac{k_{m,N} k_{temp,N} X_N}{Y_{S/B,N}};$$

$$\frac{R_{CH_4}}{3,25 \frac{M_{CH_4}}{M_{MSW}}} = \frac{R_N}{Y_{S/B,N}} = \frac{k_{m,N} k_{temp,N} X_N}{Y_{S/B,N}},$$

где R_{CO_2} – скорость выработки углекислого газа [кг/м³/день]; R_{CH_4} – скорость выработки метана [кг/м³/день]; $Y_{S/B,N}$ – коэффициент выхода субстрата/анаэробной биомассы [кг_В/кг_С].

Для оценки скорости расхода кислорода и выработки углекислого газа совместно с уравнением (2) использовалась следующая биохимическая реакция аэробного распада:



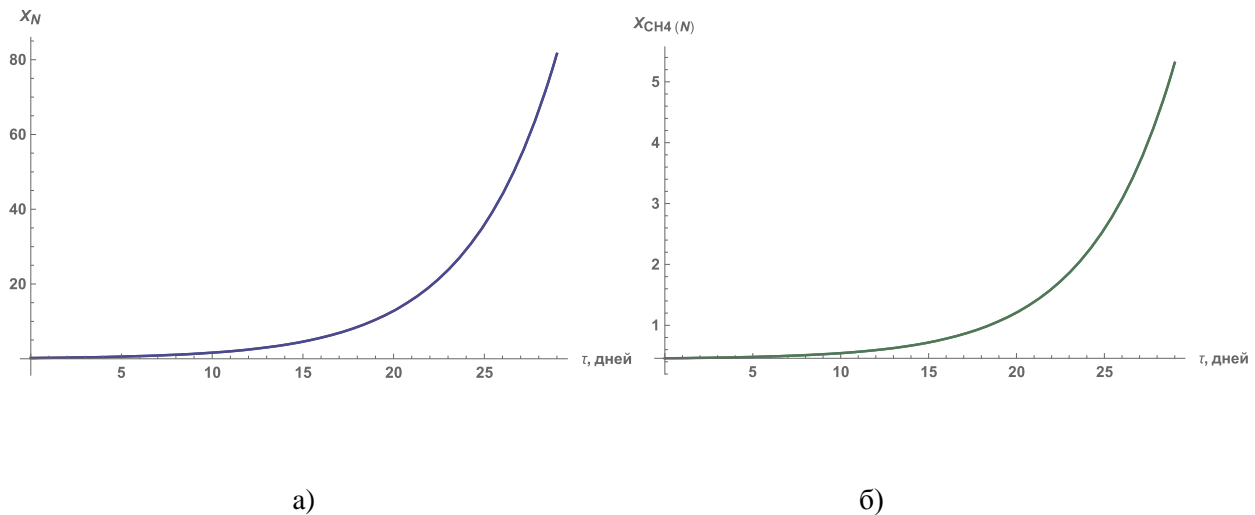
Газы расходуются и производятся только по мере роста аэробных бактерий, поэтому время распада не учитывается:

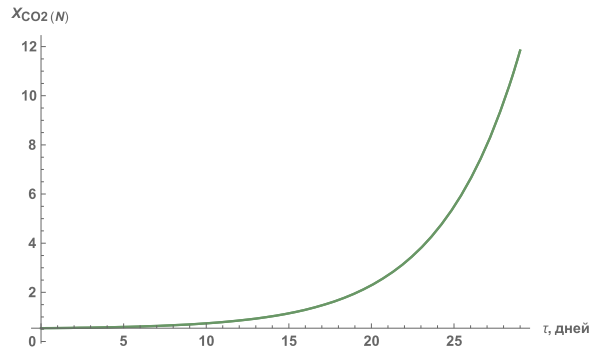
$$\frac{R_{O_2}}{-6,5 \frac{M_{O_2}}{M_{MSW}}} = \frac{R_A}{Y_{S/B,A}} = \frac{k_{m,A} k_{temp,A} \frac{x_{O_2}}{k_{O_2} + x_{O_2}} X_A}{Y_{S/B,A}};$$

$$\frac{R_{CO_2}}{6 \frac{M_{CO_2}}{M_{MSW}}} = \frac{R_A}{Y_{S/B,A}} = \frac{k_{m,A} k_{temp,A} \frac{x_{O_2}}{k_{O_2} + x_{O_2}} X_A}{Y_{S/B,A}},$$

где R_{O_2} – скорость расхода кислорода [кг/м³/день]; $Y_{S/B,A}$ – коэффициент выхода субстрата/аэробной биомассы [кг_В/кг_С]. Константы, используемые в биокинетических уравнениях, определены в работе [4].

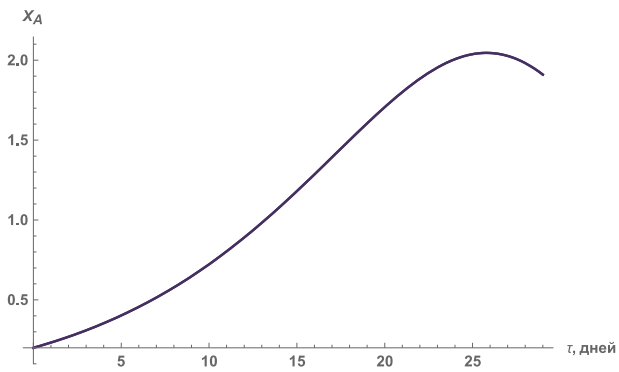
Полученные результаты, представленные на рис. 1, 2, позволяют прогнозировать скорость образования пожаровзрывоопасных газов, выработку и расход кислорода во времени.



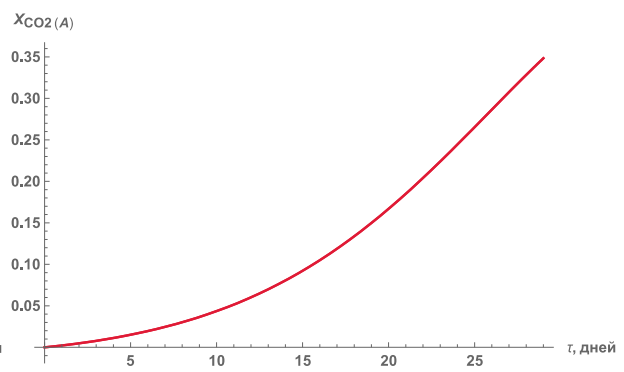


в)

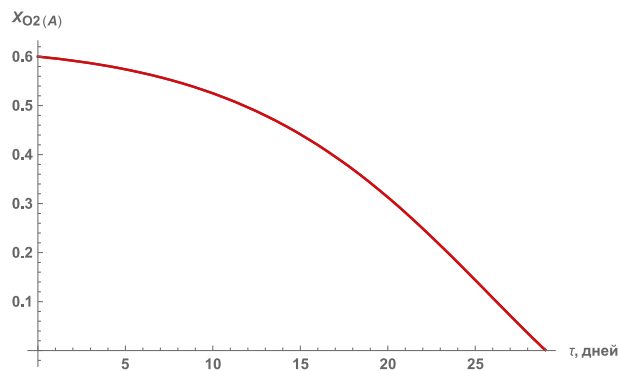
Рис. 1. Изменение концентрации биомассы (а), образование метана (б), двуокиси углерода (в) во времени для анаэробного процесса



а)



б)



в)

Рис. 2. Изменение концентрации биомассы (а), расхода кислорода (б) и образования углекислого газа (в) во времени для аэробного процесса

В целях исследования химических реакций образования взрывоопасных газов при перевозке и захоронении ТБО изучено влияние изменения значения констант скоростей на ход протекания реакций. Для оценки чувствительности констант скоростей на концентрации веществ предложена дополнительная система дифференциальных уравнений.

В результате дифференцирования $\frac{\partial}{\partial k} \left(\frac{\partial X}{\partial \tau} \right)$ исходной системы уравнений по различным параметрам получаем m – систем дифференциальных уравнений, каждая из которых содержит n – уравнений (всего $m \times n$ уравнений). Полученные системы уравнений решаются совместно с исходной системой при соответствующих начальных условиях. При этом получают не только значения концентраций X , но и $[n \times m]$ функций для каждого момента времени, которые характеризуют оценку чувствительности концентраций X к изменению различных констант скоростей реакции k .

Этот критерий чувствительности позволяет проводить оценку влияния k на концентрацию X в момент времени τ . Таким образом, становится возможным определить степень влияния параметров на различные концентрации, то есть выяснить, какие из параметров k и на каких стадиях процесса являются определяющими, а какие являются мало влияющими.

Для оценки степени влияния на концентрации веществ необходимо к этой исходной системе дифференциальных уравнений добавить систему уравнений, полученную дифференцированием исходной системы уравнений по $k_{m,N}$, $k_{m,A}$, $Y_{S/B,A}$, $Y_{S/B,N}$, k_{O_2} .

На рис. 3–7 представлены зависимости от времени критериев чувствительности по концентрациям анаэробной биомассы (X_N), аэробной биомассы (X_A), концентрации двуокиси углерода ($X_{CO_2(N)}$) для анаэробного биопроцесса, концентрации метана ($X_{CH_4(N)}$) для анаэробного биопроцесса, концентрации двуокиси углерода ($X_{CO_2(A)}$) для аэробного биопроцесса, концентрации кислорода ($X_{O_2(A)}$) для анаэробного биопроцесса для следующих параметров $k_{m,N}$, $k_{m,A}$, $Y_{S/B,A}$, $Y_{S/B,N}$, k_{O_2} . Анализ графиков позволяет увидеть, что значения критериев чувствительности могут быть положительными, отрицательными или нулевыми. В ходе реакции значение критерия чувствительности может существенно меняться.

Как следует из графиков на рис. 3, X_N наиболее чувствительна к константе $k_{m,N}$ и данная зависимость экспоненциально растет во времени. Также концентрация $X_{CO_2(N)}$ и $X_{CH_4(N)}$ чувствительна к константе $k_{m,N}$ в тот же момент времени.

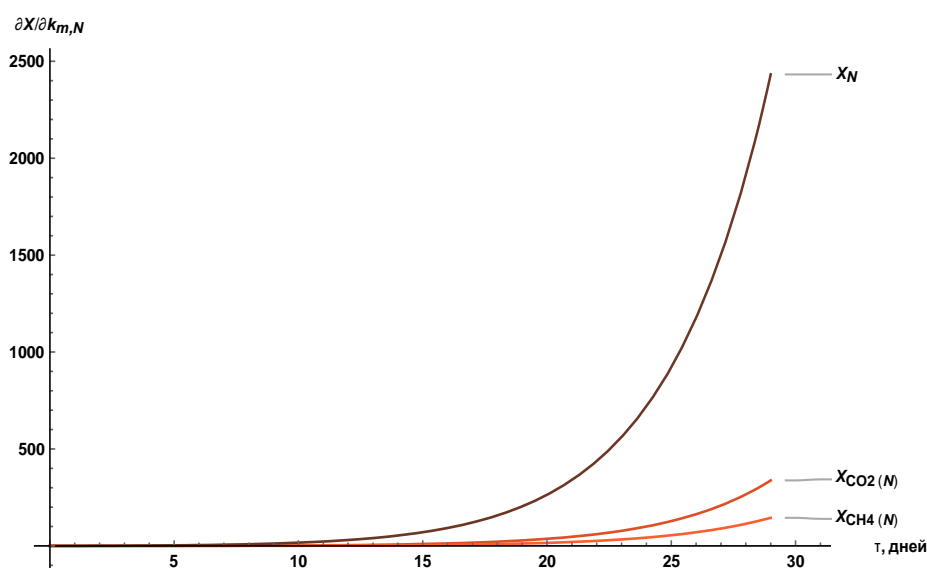


Рис. 3. Зависимость чувствительности анаэробной биомассы (X_N), концентрации двуокиси углерода ($X_{CO_2(N)}$), концентрации метана ($X_{CH_4(N)}$) для анаэробного биопроцесса во времени к изменениям $k_{m,N}$

Из графиков на рис. 4 получаем, что параметр $k_{m,A}$ оказывает положительное влияние на значение концентрации двуокиси углерода и отрицательное влияние на концентрацию кислорода. Вместе с этим данный параметр в начале временного диапазона оказывает положительное влияние на концентрацию биомассы, а в дальнейшем влияет отрицательно.

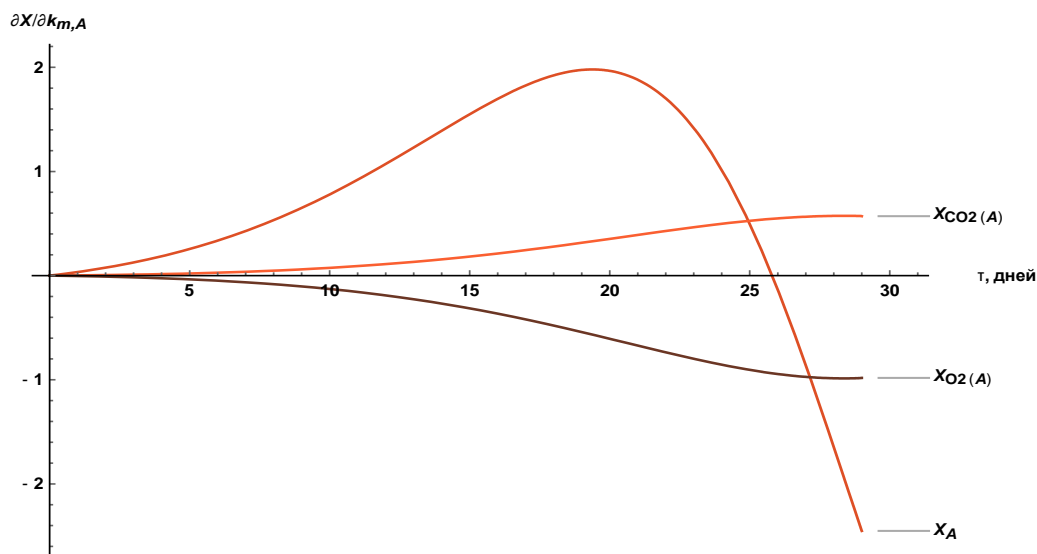


Рис. 4. Зависимость чувствительности аэробной биомассы (X_A), концентрации двуокиси углерода ($X_{CO_2(A)}$), концентрации кислорода ($X_{O_2(A)}$) для аэробного биопроцесса во времени к изменениям $k_{m,A}$

Из рис. 5 для анаэробного процесса видно, что $Y_{S/B,N}$ оказывает наибольшее отрицательное влияние на концентрацию метана и углекислого газа.

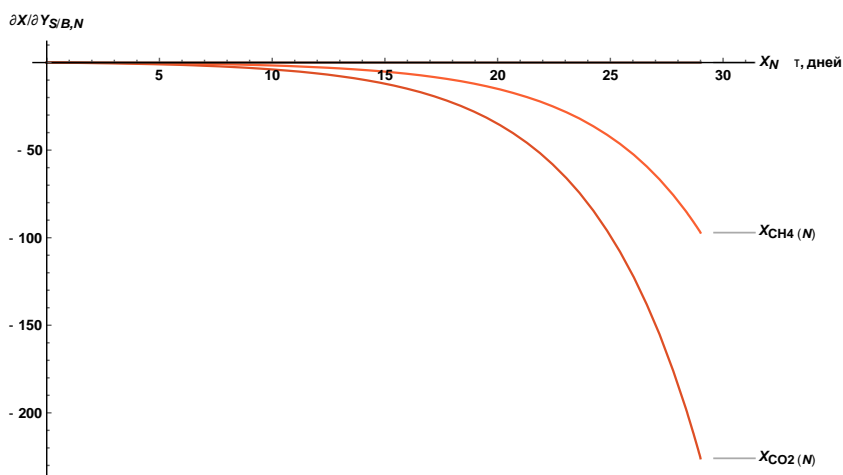


Рис. 5. Зависимость чувствительности анаэробной биомассы (X_N), концентрации двуокиси углерода ($X_{CO_2(N)}$), концентрации метана ($X_{CH_4(N)}$) для анаэробного биопроцесса во времени к изменениям $Y_{S/B,N}$

Степень влияния константы $Y_{S/B,A}$ на X_A , $X_{CO_2(A)}$, $X_{O_2(A)}$ изменяется во времени. На рис. 6, 7 показано, что наибольшее положительное влияние параметры $Y_{S/B,A}$, k_{O_2} оказывают на рост анаэробной биомассы во времени.

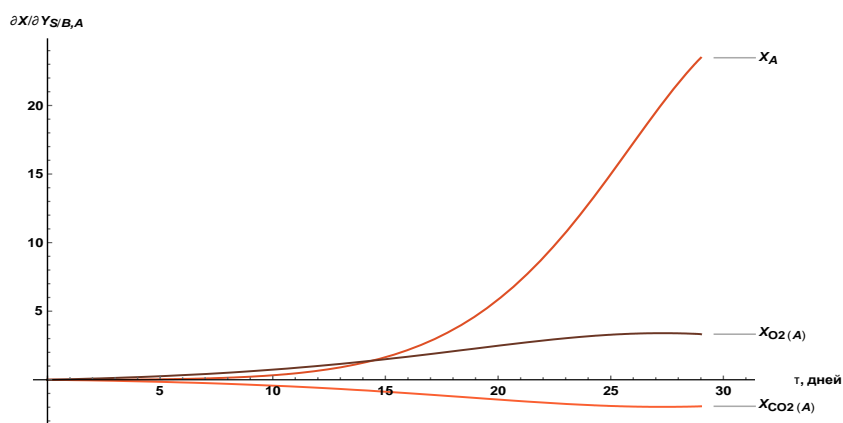


Рис. 6. Зависимость чувствительности аэробной биомассы (X_A), концентрации двуокиси углерода ($X_{CO_2(A)}$), концентрации кислорода ($X_{O_2(A)}$) для аэробного биопроцесса во времени к изменениям $Y_{S/B,A}$

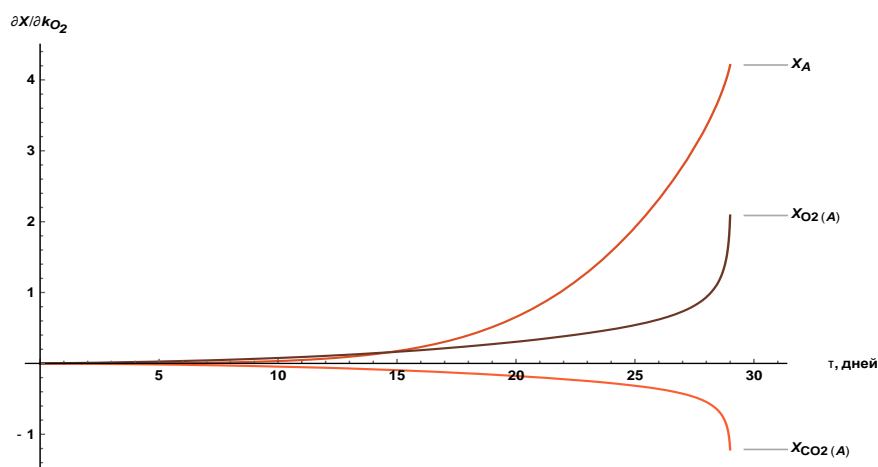


Рис. 7. Зависимость чувствительности аэробной биомассы (X_A), концентрации двуокиси углерода ($X_{CO_2(A)}$), концентрации кислорода ($X_{O_2(A)}$) для аэробного биопроцесса во времени к изменениям k_{O_2}

Изучая кинетику реакций, происходящих при захоронении и перевозке ТБО, можно прогнозировать скорость образования пожаровзрывоопасных газов во времени, оценить влияние различных параметров на биопроцессы, пожарную обстановку и своевременно предложить меры, направленные на снижение опасности.

Литература

1. Либерман Б.А., Хмелев А.С. Экологические проблемы транспортировки опасных грузов по железным дорогам России // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2016. Т. 6. № 1. С. 51–54.
2. Хайдаров А.Г., Королева Л.А., Ивахнюк Г.К. Эксергетическая оценка пожарной опасности перевозок на железнодорожном транспорте // Пожаровзрывобезопасность. 2018. Т. 27. № 10. С. 26–37.
3. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Пожнаука, 2004. Ч. 1. 713 с.; Ч. II. 774 с.

4. Omar Hecham M. Treatment of Landfill Waste, Leachate and Landfill Gas: Modelling/Simulation and Experimental Studies // Electronic Thesis and Dissertation Repository. 2016. 173 p.

References

1. Liberman B.A., Hmelev A.S. Ekologicheskie problemi transportirovki opasnih gruzov po jeleznim dorogam Rossii // Sovremennie problemi transportnogo kompleksa Rossii. 2016. T. 6. № 1. S. 51–54.

2. Haidarov A.G., Koroleva L.A., Ivahnyuk G.K. Eksergeticheskaya ocenka pojarnoi opasnosti perevozok na jeleznodorojnom transporte // Pojarovzrivobezopasnost. 2018. T. 27. № 10. S. 26–37.

3. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. Pojarovzrivoopasnost veschestv i materialov i sredstva ih tusheniya: spravochnik. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Pojnauka, 2004. Ch. 1. 713 s.; Ch. II. 774 s.

4. Omar Hecham M. Treatment of Landfill Waste, Leachate and Landfill Gas: Modelling/Simulation and Experimental Studies // Electronic Thesis and Dissertation Repository. 2016. 173 p.