

УДК 628.336.515

ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ ПО КИНЕТИКЕ МЕТАНОГЕНЕЗА ОТХОДОВ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

*д-р техн. наук, проф. Г.Н. АБАЕВ,
канд. техн. наук, доц. Р.А. АНДРЕЕВА, Л.П. ШЕВЧЕНКО
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается применение уравнения Моно – Герберта для описания и обобщения кинетики органосодержащих отходов и их различия. Показаны возможные различия кинетических констант для отходов очистных сооружений, являющихся важнейшей кинетической характеристикой различия отходов, существенной при выборе способа переработки и расчёте аппаратуры для неё. Несмотря на их различие, рассматривается возможность обобщения кинетических констант для разнообразных отходов. На основе обобщения для определённого типа отходов показано, что при их метаногенезе максимальная конверсия не превысит 66 %. Оставшаяся после метаногенной обработки органика не соответствует первоначальной и обладает другими, полезными для глубокой переработки свойствами: лучше обезвоживается, подвергается термическому разрушению при более низкой температуре, при пиролизе даёт пирогаз, в котором меньше углекислоты и больше углеводородов. Таким образом, метаногенная обработка отходов – закономерная, необходимая стадия КПОО, которая позволит, не расходуя биогаз, поддерживать жизнедеятельность метаногенной стадии за счёт горячей воды, полученной на стадии термодеструкции оставшейся после метаногенеза органики отходов.

Для технологических расчётов стадий КПОО необходимы знания их кинетических закономерностей [1; 2]. Особенно необходимо знание кинетики для выбора начальной концентрации субстрата, определения времени пребывания и габаритов метантенка, а также для оценки диффузионных ограничений и требований к перемешиванию. Это тем более важно потому, что процесс метаногенеза медленный, требует значительных габаритов для метантенка и поэтому искать пути повышения эффективности и ускорения метаногенеза – важная практическая задача.

Основную сложность для моделирования кинетики анаэробного сбраживания представляет стадийность процесса, ограничивающая возможность использования классических уравнений ферментативной кинетики Моно и Михаэлиса – Ментен для формального описания одновременно протекающих стадий – кислотного гидролиза и щелочного сбраживания субстратов. Один из вариантов формального учета единовременности и взаимного влияния процессов кислото- и метанообразования основан на введении функции субстратного ингибирования. Важной особенностью периодических процессов анаэробной ферментации в сравнении с непрерывными является отсутствие притока свежего питательного субстрата. Отличаются также и скорости развития микроорганизмов кислотной ($ч^{-1}$) и щелочной ($сут^{-1}$) стадий. Поэтому скорость реакций преобразования органического вещества отходов зависит от скорости отмирания микроорганизмов отдельных стадий, что требует учета в кинетической модели. Помимо названных особенностей следует учитывать сложность контроля концентрации биомассы в ферментационной среде (крупность микроорганизмов составляет менее одного микрона), а также ее крайне незначительный прирост.

Основная часть. Объектом исследования в лабораторных условиях стали разнообразные органосодержащие отходы, но наиболее подробно исследовались отходы промышленных очистных сооружений нефтепереработки (ОАО «Нафтан») и нефтехимии (ОАО «Полимир») города Новополоцка [3]. При этом отходы, поступив на сооружения биохимической очистки (аэротенки, биофильтры), подвергаются окислительной деструкции в разной степени.

Исследовались также смеси отходов нефтеперерабатывающей промышленности (ОАО «Нафтан») с растительными, в частности картофельной кожурой, измельченной до крупности 0,5 мм. Смесь готовилась путем добавки растительных отходов к основной массе отходов очистных сооружений ОАО «Нафтан» из соотношения 1:10 по массе. Следует отметить непостоянство состава отходов такого рода.

Анализ всех вышеназванных особенностей позволил выбрать в качестве наиболее приемлемого варианта описания кинетики периодической анаэробной ферментации уравнение Герберта [4]:

$$-\frac{dS}{d\tau} = \frac{K_1 \cdot S}{1 + K_2 \cdot S} + K_3, \quad (1)$$

где S – содержание органического вещества в отходах, г/г; τ – время, сут; K_1 – константа скорости преобразования органического вещества, (г/г сут); K_2 – константа сорбционного ингибирования процесса, г/г; K_3 – константа скорости торможения процесса за счет отмирания бактерий, г/г сут.

Для получения методики расчета кинетических констант анаэробной ферментации по экспериментальным данным преобразуем (1) следующим образом:

$$\begin{aligned} -\frac{dS}{d\tau} &= \frac{K_1 S + K_3}{1 + K_2 \cdot S}; \Rightarrow \\ -\frac{dS}{d\tau} &= \frac{(K_1/K_2)S + (K_3/K_2) + K_3 \cdot S}{1/K_2 + S}, \end{aligned} \quad (2)$$

введя замену $K_1/K_2 = K_4$; $1/K_2 = K_5$, получаем:

$$\begin{aligned} -K_5 + S \frac{dS}{d\tau} &= K_4 S + K_3 \quad K_5 + S; \\ \frac{K_5 dS}{S + \frac{K_3}{K_4}} + \frac{S \cdot dS}{S + \frac{K_3}{K_4}} &= -K_4 d\tau; \\ \frac{K_5 dS}{S + \frac{K_3 K_5}{K_4 + K_3}} + \frac{S \cdot dS}{S + \frac{K_3 K_5}{K_4 + K_3}} &= -\frac{K_4}{K_4 + K_3} d\tau. \end{aligned} \quad (3)$$

Рассмотрим предельное состояние анаэробной обработки, соответствующее $\tau \rightarrow \infty$, $S \rightarrow S_\infty = \text{const}$, для которого (1) запишется как:

$$\frac{K_4 \cdot S_\infty}{K_5 + S_\infty} + K_3 = 0.$$

Отсюда

$$S_\infty = -\frac{K_3 \cdot K_5}{K_4 + K_3} = \alpha.$$

Введем обозначения:

$$a = \frac{K_3 K_5}{K_4 + K_3}; \quad \vartheta = K_4 + K_3.$$

Таким образом, принятое отношение констант (α) имеет физический смысл предельной массы остаточного органического вещества осадка при бесконечном времени анаэробной обработки S_∞ , дол. ед. С учетом принятых обозначений преобразуем (3):

$$\begin{aligned} K_5 \frac{d(S+a)}{S+a} + S \frac{d(S+a)}{S+a} &= -\vartheta \cdot d\tau; \\ K_5 \frac{d(S+a)}{S+a} + \frac{d(S+a) \cdot \left(\frac{dS}{d(S+a)} - a \right)}{S+a} &= -\vartheta \cdot d\tau; \\ K_5 \frac{d(S+a)}{S+a} + \frac{dS}{S+a} - a \cdot \frac{d(S+a)}{S+a} &= -\vartheta \cdot d\tau; \\ K_5 \frac{d(S+a)}{S+a} + \frac{S+a}{S+a} dS - a \frac{d(S+a)}{S+a} &= -\vartheta \cdot d\tau; \\ \frac{d(S+a)}{S+a} \cdot (K_5 - a) + dS &= -\vartheta \cdot d\tau. \end{aligned} \quad (4)$$

Проинтегрируем уравнение (4) от 0 до τ ($S_0 \geq S \geq S_\infty$), где S_0 – начальное содержание органического вещества в составе осадка, г/г:

$$(K_5 - a) \ln \frac{S+a}{S_0+a} + S - S_0 = -\vartheta \tau. \quad (5)$$

Обозначим:

$$K_5 - a = c;$$

$$c = K_5 - \frac{K_3 K_5}{K_4 + K_3} = \frac{K_5 K_4}{K_4 + K_3}.$$

Тогда из (5) получим:

$$\ln\left(\frac{S+a}{S_0+a}\right) = S_0 - S \cdot \frac{1}{c} - \frac{v}{c} \cdot \tau, \quad (6)$$

или в общем виде нелинейная зависимость:

$$\tau = \frac{1}{v} \cdot (S_0 - S) - \frac{c}{v} \ln\left(\frac{S+a}{S_0+a}\right). \quad (7)$$

Для периодического процесса на момент его завершения: $\tau = \tau_k$, где τ_k – длительность процесса, сут; S_k – содержание остаточного органического вещества в составе сброженных отходов, г/г, (6) имеет вид:

$$\ln\left(\frac{S_k+a}{S_0+a}\right) = S_0 - S_k \cdot \frac{1}{c} - \frac{v}{c} \tau_k.$$

Обозначив

$$\frac{\ln\left(\frac{S_k+a}{S_0+a}\right)}{S_0 - S_k} = x; \quad \frac{\tau_k}{S_0 - S_k} = y, \quad (8)$$

запишем (6) в виде линейной зависимости:

$$y = \frac{1}{v} - \frac{c}{v} x.$$

Определение кинетических констант прямых и обратных биохимических реакций ферментации (K_1, K_2, K_3) начинается с уточнения остаточной величины беззольного вещества в образцах отходов (a), несброженного на 35 суток. Эту процедуру проводили двумя способами обработки экспериментальных данных по принятому кинетическому уравнению (6). Расчет осуществлялся на ЭВМ с использованием пакета «Statistika» (нелинейная форма кинетического уравнения (7)) и «Excel» (линейная форма кинетического уравнения (8)). При этом задавался перебор значений ($a = -S_\infty$) от нуля до значения конечной концентрации органического вещества в отходах на последние сутки протекания процесса (S_k). Так как максимальные скорости превращения беззольного вещества наблюдаются в первые сутки метаногенеза, при подборе данных используется большее количество точек на начальном участке развития процесса для улучшения качества формального описания кинетической кривой (рис. 1).

Искомое значение остаточной концентрации органического вещества принимается при достижении максимальной сходимости экспериментальных и расчетных значений обрабатываемых функций или при максимальном значении коэффициента корреляции ($\max R^2$).

Используя экспериментальные (данные при рассчитанном $a = -S_\infty$), две предложенные выше формы записи кинетического уравнения анаэробного сбразивания (нелинейная (7) и линейная (8) зависимости) позволяют автоматически определить коэффициенты уравнений c и v .

Применяя ранее введенные формулы для замены коэффициентов уравнений, можно рассчитать кинетические константы уравнения анаэробной ферментации (1) из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} K_4 = \frac{v \cdot c}{c + a}; \\ K_3 = \frac{v \cdot a}{c + a}; \\ K_5 = c + a \end{cases} \text{ и } \begin{cases} K_1 = K_4 / K_5; \\ K_2 = 1 / K_5. \end{cases}$$

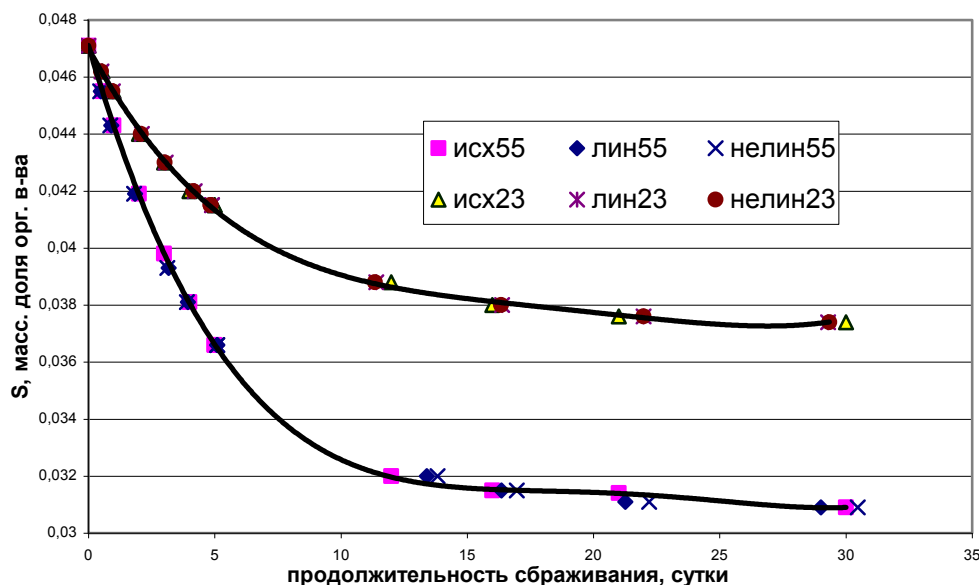


Рис. 1. Изменение беззольного вещества смеси отходов во времени ($S_0 = 4,71$ % масс; верхняя кривая при $+23$ °C для исходных данных и данных, рассчитанных по уравнениям в линейной и нелинейной форме; нижняя соответственно при температуре сбраживания $+55$ °C)

Результаты экспериментов показали закономерный характер изменения концентрации органического вещества в составе анализируемых отходов в процессе анаэробной обработки. Экспоненциальный характер зависимостей (см. рис. 1), полученных для различных температур, подтверждает возможность описания кинетики процесса уравнением Герберта (1).

Экспериментальные и расчетные данные кинетики анаэробной ферментации отходов различного происхождения и разного состава представлены в таблице 1.

Таблица 1

Отход и его состав (влажность/органическое вещество, дол. ед.)	Эксперимент		Расчет			
	температура сбраживания, °C $\pm 1,5$	конверсия беззольного вещества, %	константы			
			a , дол. ед.	K_1 , г/г сут	K_2 , г/г	$-K_3$, г/г сут
Отходы нефтепереработки 0,963/0,0245	23	22,45	0,0171	0,001767	40,47	0,000098
	33	33,88	0,0161	0,029631	30,79	0,00095
	55	37,55	0,01525	0,030301	34,00	0,00096
Отходы нефтепереработки 0,945/0,0378	23	10	0,03530	0,001097	25,23	0,00035
	33	18	0,03195	0,005901	23,22	0,00073
	55	21,6	0,02914	0,031085	18,88	0,00201
Смесь отходов нефтепереработки с растительными отходами 0,933/0,0471	23	23	0,0373	0,048261	11,59	0,00317
	33	32	0,03232	0,055011	8,08	0,00228
	55	36	0,03084	0,111769	6,90	0,00438
Отходы нефтехимии 0,961/0,0278	23	28,78	0,0168	0,01459	18,89	0,00036
	33	38,13	0,0157	0,04785	6,92	0,00084
	55	48,92	0,0135	0,08082	1,67	0,00112

Анализ зависимости константы скорости прямой биохимической реакции K_1 от температуры ферментации показывает увеличение K_1 с ростом температуры от 23 до 55 °C для всех анализируемых отходов. Самые большие значения данной константы определены для смеси отходов очистных сооружений ОАО «Нафтан» с растительными отходами. На отходах ОАО «Полимир» значение K_1 значительно выше, чем на отходах нефтепереработки: при высокой температуре ($+55$ °C) – в 2,5 раза; при 23 °C в десятки раз. Как следует из кинетики, на процесс анаэробного сбраживания (кинетическая область) влияет как сорбционное торможение субстратом (K_2), так и торможение продуктами метаногенеза (K_3), которое растет (как и K_1) с ростом температуры биохимической реакции. Константа K_2 , характеризующая скорость сорбционного ингибирования субстратом, несколько растёт с ростом отношения О/Н (табл. 2). Более высокие значения K_1 наблюдаются на отходах ОАО «Полимир».

Таблица 2

Значение кинетических констант анаэробного сбраживания отходов очистных сооружений нефтепереработки ОАО «Нафтан» с разной начальной концентрацией органического вещества при $T = +55\text{ }^{\circ}\text{C}$

Исходное содержание органического вещества, отношение О/Н	Кинетические константы				Конверсия
	S_0 , %; О/Н	K_1 , г/г сут	K_2 , г/г	K_3 , г/г сут	
2,45; 1,96	0,030301	34	-0,00096	0,01525	37,5
3,78; 2,19	0,031085	18,88	-0,00201	0,02914	21,6
4,05; 1,72	0,01514	12,74	-0,00061	0,0266	26
5,17; 1,76	0,03307	5,3	-0,00162	0,0389	21,4
8,55; 1,89	0,02796	4,99	-0,00176	0,0478	37,5

Анализ кинетических констант процесса показывает, что растительная добавка (картофельная кожура) оказывает на скорость анаэробного сбраживания осадков очистных сооружений действие, аналогичное действию дополнительным обогревом: увеличивает скорость прямой биохимической реакции (рост K_1), одновременно снижая сорбционное ингибирование (K_2). При этом снижение сорбционного ингибирования при 23 и 55 °С было соответственно в 2,2 и 2,7 раза, в то время как рост температуры в том же пределе на тех же отходах, но с добавкой, уменьшал ингибирование лишь на 30 %. Таким образом, растительная добавка проявляет иную эффективность в снижении сорбционного ингибирования, чем в данном случае температурный фактор.

Влияние растительной добавки сказывается на изменении значений K_3 при низких температурах в 10 раз, а при высоких в 2 раза, что приводит к снижению скорости ферментации. Причем минимум ингибирования за счет отмирания бактерий (K_3) наблюдается при температуре 33 °С. Влияние данной константы ингибирования на скорость протекания процесса также предполагается снижать за счет изменения организации процесса. Для поддержания высоких скоростей процесса мы предлагаем периодически выводить из системы часть сбраживаемых отходов и вводить растительную добавку для стимулирования процессов ферментации трудно сбраживаемых отходов нефтепереработки. При высоких концентрациях органического вещества ($S_0 > 10\%$ масс.) может наблюдаться снижение скорости анаэробного сбраживания за счет ингибирования высокой концентрации продуктов метаногенеза. Продуктами метаногенеза являются биогаз, удаляемый из метантенка, а также жидкие продукты метаногенеза. Однако ранее проведенными исследованиями была показана практическая целесообразность ведения процесса на высоких плотностях субстрата, поскольку, несмотря на торможение скоростей процесса сбраживания, итоговая производительность метантенка по целевому продукту увеличивается.

Рассмотрим предельное состояние анаэробного сбраживания.

Из уравнения (1) следует, что при ($\tau \rightarrow \infty$) $\left(\frac{dS}{d\tau} \rightarrow 0\right)$, $S_{\infty} = \frac{K_3}{K_1 - K_2 \cdot K_3} = \alpha$ постоянна для любых

начальных концентраций субстрата, но, анализируя рассчитанные значения констант, из таблицы 2 видно, что предельная концентрация органического вещества (α) имеет определенную зависимость от исходной концентрации для данных видов отходов, следовательно, постоянной может быть только предельная конверсия (X_{∞}).

Исследованиями Академии коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова (Москва) установлено [4], что все количество газа, выделяемое в процессе сбраживания, образуется за счет распада жиров, углеводов, белков. Как следует из данных [4], содержание жиров, углеводов и белков в органическом веществе осадков составляет 65...80 %. Остальная часть органического вещества в основном представляет собой лигниногумусовый комплекс, который в газообразовании не участвует. Также установлено, что процесс распада органических веществ осадков в анаэробных условиях влечет за собой образование гуминовых веществ, содержание которых в органическом веществе сброженного осадка достигает 25 % и более [4]. Чем выше доза загрузки, тем выше преимущества термофильного процесса по выходу газа. Как указывалось в [4], снижение влажности загружаемого в метантенк осадка при одном и том же времени пребывания обеспечивает увеличение нагрузки и, наоборот, при одной и той же нагрузке увеличивается продолжительность сбраживания. При сбраживании осадка одной и той же влажности увеличение нагрузки приводит к соответствующему снижению продолжительности сбраживания.

Итак, предел сбраживания будет зависеть не только от биохимического состава органического вещества, но и от влажности и зольности осадка, поскольку от них зависит изменение текучести и объем осадка. При удалении из осадков влаги и соответствующем повышении их концентрации происходит увеличение их зольности.

Как показано в [4], с увеличением зольности осадка снижается практический предел распада, а при увеличении зольности до 76,7 % сбраживание практически прекращается [4].

В представленной нами работе предпринята попытка получить кинетические характеристики метаногенеза отходов нефтепереработки, взятого с иловых площадок очистных сооружений нефтеперерабатывающего завода ОАО «Нафтан» г. Новополоцка. Исходные данные для кинетической обработки термобильного режима ($T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$) для различных начальных концентраций субстрата (от 2,45 до 8,55 % масс.) представлены в таблице 2.

Были проанализированы данные опытов для отходов очистных сооружений ОАО «Нафтан» при термобильном режиме сбраживания с разным содержанием начальной концентрации органического вещества из таблицы 1. Во всех опытах конверсия органического вещества не превышает 40 %, а предельное значение концентрации субстрата тем выше, чем выше его начальная концентрация. Это прямо указывает на то, что во всех рассмотренных отходах α различается, т.е. кинетические константы неодинаковы. В рассматриваемых опытах состав сбраживаемых отходов имеет различное отношение исходной органики к неорганике, состав отличается количеством исходного содержания влаги (W) и, соответственно, качественной характеристикой органического вещества, что объясняет различия в значениях кинетических констант. Это указывает на то, что существует некая зависимость предела сбраживания от исходного содержания органического вещества и его природы (в частности, за «старение» отходов можно условно принять безразмерную величину – изменения O/H).

Поскольку рассчитанные значения конверсии приближаются к практически полученным значениям на данных видах отходов, мы можем утверждать, что подобранные нами значения кинетических констант удовлетворительно описывают протекающий процесс анаэробной ферментации и всегда можно найти теоретическое время контактирования до заданной нам величины сбраживания.

Из уравнения (2) для $S = S_k$, можно определить необходимое τ , взяв определённый интеграл:

$$\tau = \int_{S_0}^{S_k} \frac{1 + K_2 \cdot S_i}{K_3 + S (K_1 + K_2 \cdot K_3)} dS. \quad (9)$$

Проведенные исследования показали, что для описания метаногенеза органосодержащих отходов можно использовать модификацию уравнения Герберта с кинетическими коэффициентами, учитывающими индивидуальные характеристики отходов (S_0 , W/H , O/H). Экспериментальные данные и результаты моделирования позволили установить следующее: на скорость сбраживания влияет как температурный фактор, так и исходный состав сбраживаемых отходов (органосодержащего субстрата); добавление растительных отходов в сбраживаемый продукт увеличивает скорость сбраживания (кинетический коэффициент K_1 увеличивается в 3 раза), что позволяет сократить время процесса (габариты аппарата).

Приведенные результаты подтверждают возможность использования разработанной кинетической модели для описания и прогнозирования протекания процесса анаэробного сбраживания отходов нефтепереработки, в том числе для расчета времени сбраживания, обеспечивающего требуемую величину конверсии органического вещества отходов.

Во всех 15-ти рассмотренных случаях (см. табл. 1) кинетических исследований для различных органосодержащих отходов и различных температур предельная конверсия метаногенеза составляла менее 50 %. Поэтому представляло интерес определить максимальную конверсию метаногенеза на основе обобщения всех кинетических данных.

В таблице 3 представлены результаты для всех 15-ти опытов: для различных отходов, начального содержания органики в отходах, АСВ, температур.

Сравнение проведено для максимально достигнутого (экспериментального) значения конверсии, которая вычислялась как экспериментальная конверсия:

$$X = \frac{G_0 \cdot S_0 - G_k \cdot S_k}{G_0 \cdot S_0}. \quad (10)$$

Расход шихты после метантенка составил

$$G_k = G_0 - G_0 \cdot S_0 \cdot X = G_0(1 - S_0 \cdot X).$$

Подставив G_k в (10), получим

$$X = \frac{G_0 \cdot S_0 - G_0(1 - S_0 \cdot X)S_k}{G_0 \cdot S_0} = \frac{S_0 - S_k + S_0 \cdot X \cdot S_k}{S_0}.$$

Откуда, выражая X из левой и правой частей, получим:

$$X = \frac{S_0 - S_k}{S_0(1 - S_k)}. \quad (11)$$

Для максимального, расчётного состояния

$$X_{\infty} = \frac{S_0 - a}{S_0(1-a)} = \frac{1 - \frac{a}{S_0}}{1 - a}; \quad a < S_0. \quad (12)$$

Таблица 3

Сравнение экспериментальной и максимальной расчётной конверсии X и X_{∞}

№ опы-	Характеристика продукта	S_0	a/S_0	$1 - a/S_0$	$1 - S_x$	Реальная конверсия на 35-е сутки, X , %	Предельная конверсия, X_{∞} , дол. ед., для $\tau \rightarrow \infty$ по (12); T °C
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Отходы очистных нефтепереработки	0,0378	0,9327	0,0673	0,9647	10	0,0698; $T = 23$ °C
2	Отходы очистных нефтепереработки	0,0378	0,84514	0,1549	0,9681	18	0,1599; $T = 33$ °C
3	Отходы очистных нефтепереработки	0,0517	0,7522	0,2478	0,9611	21,4	0,2578; $T = 55$ °C
4	Отходы очистных нефтепереработки	0,0378	0,7703	0,2297	0,9707	21,6	0,2366; $T = 55$ °C
5	Отходы очистных нефтепереработки	0,0245	0,6977	0,3023	0,9829	22,45	0,3075; $T = 23$ °C
6	Смесь отходов очистных нефтепереработки с растительными добавками (картофельная кожура)	0,0471	0,79227	0,2077	0,9523	23	0,2158; $T = 55$ °C
7	Отходы очистных нефтепереработки	0,0405	0,6577	0,3423	0,9734	26	0,3516; $T = 55$ °C
8	Отходы очистных нефтехимии	0,0278	0,6054	0,3946	0,9832	28,78	0,4013; $T = 23$ °C
9	Смесь отходов очистных нефтепереработки с растительными добавками (картофельная кожура)	0,0471	0,6582	0,4418	0,969	32	0,3527; $T = 33$ °C
10	Отходы очистных нефтепереработки	0,0245	0,65865	0,3414	0,9839	33,88	0,3469; $T = 33$ °C
11	Смесь отходов очистных нефтепереработки с растительными добавками (картофельная кожура)	0,0471	0,65493	0,3451	0,9692	36	0,356; $T = 55$ °C
12	Отходы очистных нефтепереработки	0,0245	0,56	0,44	0,9521	37,55	0,462; $T = 55$ °C
13	Отходы очистных нефтепереработки	0,0855	0,5225	0,3775	0,9848	37,5	0,383; $T = 55$ °C
14	Отходы нефтехимии	0,0278	0,563	0,437	0,9844	38,13	0,4439; $T = 33$ °C
15	Отходы нефтехимии	0,0278	0,4872	0,5118	0,9865	48,92	0,5188; $T = 55$ °C

Проанализируем зависимость максимальной, расчётной конверсии X_{∞} от начальной концентрации органики S_0

Рассмотрим

$$\frac{dX}{dS_0} \rightarrow \frac{dX}{dS_0} = \frac{1}{1-a} \cdot \frac{a}{(S_0)^2}. \quad (13)$$

Откуда видно, что $\frac{dX}{dS_0}$ всегда положительно, т.е. конверсия растёт с ростом S_0 .

В таблице 3 и на рисунке 2 приведено сравнение конверсии для предельного состояния системы метаногенеза, реально достигаемого на 35-е сутки.

Используя для вычисления X_{∞} и кинетические константы всех опытов (a), мы можем обобщить и сопоставить результаты 15-ти опытов.

Реально достигнутая конверсия на 35-е сутки и расчётная конверсия по формуле (10) проиллюстрированы в таблице 3 и на рисунке 2. На рисунке 2 представлена зависимость реальной конверсии X % от расчётной X_{∞} (дол. ед.), взятых по их значениям в столбцах 7, 8 таблицы 3 для всех 15 случаев кинетических расчётов.

Как следует из выражения для зависимости между X и X_{∞} , при $X_{\infty} \rightarrow 1$, $X \rightarrow$: 66,8 %, что подтверждается практическими данными. Конверсия метаногенеза во всех случаях < 1 .

Часть непревращённой органики, прошедшей метаногенную обработку, не означает, что она осталась неизменной, побывав в метаногенной обработке. Органика в составе отходов, пройдя метаногенную обработку, приобретает новые свойства [5; 6]:

- пиролизуется при более низкой температуре;
- лучше обезвоживается;
- при её пиролизе получают пирогаз с большей калорийностью (меньшим содержанием углекислого газа);
- окислительная термодеструкция органики осуществляется при более низкой температуре.

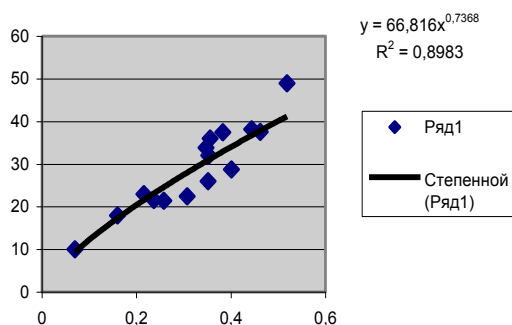


Рис. 2. Взаимосвязь реальной конверсии X и предельной конверсии X_{∞} (см. табл. 3)

Таким образом, метаногенная обработка отходов в составе КПОО перед их подачей на стадию термодеструкции является естественной и целесообразной необходимостью, позволяющей существенно улучшить ТЭП всего процесса переработки органосодержащих отходов в целом. Всё это нашло отражение в патенте [1]. Отличительной особенностью КПОО является тот факт, что биогаз, полученный на метаногенной стадии, для её жизнедеятельности не расходуется. Для этих целей используется горячая вода, полученная при охлаждении дымовых газов стадии термодеструкции. Согласно тепловому балансу теплоэнергетических источников [7], полученных на стадии термодеструкции, достаточно не только для жизнеобеспечения стадии метаногенеза, но и для поставки внешним потребителям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ переработки органосодержащих отходов и установка для его осуществления: пат. № 2253 Респ. Беларусь / Г.Н. Абаев, Р.А. Андреева, С.А. Статкевич; заявитель Полоц. гос. ун-т; заявл. 03.07.1996; опубл. 30.09.1998.
2. Андреева, Р.А. Комплексная переработка органосодержащих отходов в высококалорийный топливный газ – важное направление решения экологических и энергетических задач республики Беларусь / Р.А. Андреева, Г.Н. Абаев // Обзорная информация; М-во прир. ресурсов и охраны окр. среды. – Минск, 2001. – 47 с.
3. Абаев, Г.Н. Моделирование кинетики метаногенеза органосодержащих отходов очистных сооружений / Г.Н. Абаев, Р.А. Андреева // Химическая промышленность. – СПб., 2009. – № 8.
4. Гюнтер, Л.И. Метантенки / Л.И. Гюнтер, П.П. Гольдфарб. – М.: Стройиздат, 1991.
5. Статкевич, С.А. Моделирование стадии термодеструкции комплексной переработки органосодержащих отходов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / С.А. Статкевич. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 229 с.
6. Ельшина, И.А. Моделирование процессов обезвоживания в комплексной переработке органосодержащих отходов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / И.А. Ельшина. – Новополоцк, ПГУ, 2006. – 130 с.
7. Абаев, Г.Н. Кинетика и моделирование при внедрении и повышении эффективности биогазовых установок / Г.Н. Абаев, Р.А. Андреева, И.А. Ельшина // Химическая промышленность. – СПб., 2011. – № 5. – С. 245.

Поступила 24.07.2012

SYNTHESIS OF DATA ON KINETICS OF METANOGENESIS OF TREATMENT FACILITIES WASTE PRODUCTS

R. ANDREEVA, G. ABAEV, L. SHEVCHENKO

Application of the equation Mono-Herbert for the description and generalization of kinetics of organic containing wastes and their distinction is considered. Possible distinctions of kinetic constants for waste of treatment facilities are shown. Distinction of kinetic constants is the most important kinetic characteristic of distinction of waste, important at a choice of a way of processing and calculation of equipment for it. Despite distinction, possibility of generalization of kinetic constants for various waste is considered. On the basis of generalization for a certain type of waste it is shown that at their metanogenesis the maximum conversion won't exceed 66 %. The organics remained after metanogenesis processing doesn't correspond the initial one and possesses other properties useful for deep processing: it is better dewatered, is exposed to thermal destruction at lower temperature, at pyrolysis gives gas in which there are less carbonic acids and more hydrocarbons. Owing to stated metanogenesis of waste is a natural, necessary stage of a complex recycling technology which will allow to support activity of a metanogenesis stage without spending biogas, at the expense of the hot water received at a stage of a thermodestruction remained after metanogenesis of organics of waste.