

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ АНАЭРОБНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ

А.А. Фоменкова, А.А. Ключарёв (Санкт-Петербург)

В настоящее время системам очистки сточных вод на предприятиях и в коммунальном хозяйстве уделяется все больше внимания. Это связано, прежде всего, с ужесточением нормативных требований, предъявляемых к экологической безопасности и защите окружающей среды, а также с общей тенденцией внедрения принципов осознанного потребления. И здесь особое место занимают локальные системы анаэробной биологической очистки (САБО) сточных вод, позволяющие очищать стоки с высокими концентрациями органических загрязнений и получать в качестве побочного продукта энергоноситель – биогаз. Такие системы очистки устанавливаются практически на всех предприятиях пищевой промышленности. САБО относятся к сооружениям, рассчитанным на длительный срок эксплуатации, чувствительным к изменению внешних воздействий, что определяет необходимость непрерывного контроля их технического состояния (ТС) и своевременного принятия решений по техническому обслуживанию.

Отличительной особенностью оценивания технического состояния САБО является существенное влияние условий жизнедеятельности, структуры и состояния биомассы в анаэробном биореакторе. Полную информации о состоянии биомассы как правило не удастся получить с помощью приборных и даже лабораторных наблюдений. Учитывая специфику работы САБО предлагается следующая модель оценки ее технического состояния (рис.1).

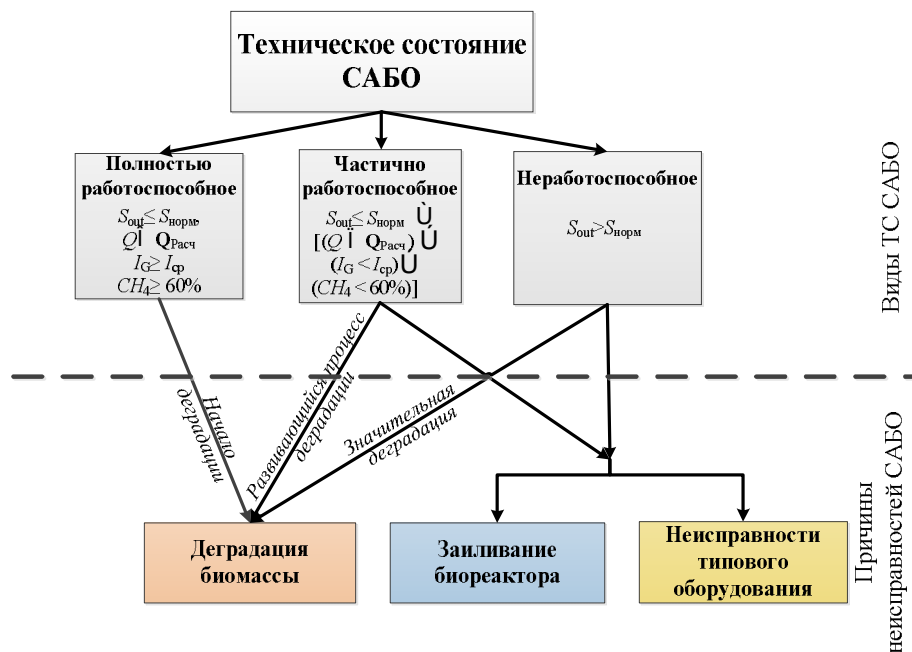


Рис. 1. Структура анализа технического состояния системы анаэробной биологической очистки

(S_{out} – остаточная концентрация загрязнений в очищенной воде; $S_{норм}$ – заданная максимальная концентрация загрязнений в очищенной воде; I_G – производительность системы по биогазу; $I_{ср}$ – средний расчетный выход биогаза для данного типа сырья; Q_{in} – количество сточных вод, поступающих с предприятия на очистку в единицу

времени; $Q_{\text{расч}}$ – расход жидкости, предусмотренный технологическим процессом, CH_4 – содержание метана в биогазе)

В дополнение к классическому разделению технического состояния на работоспособное, частично неработоспособное и неработоспособное, сформулированному, в частности, в работах [1, 2], для анаэробных биореакторов нами вводится оценка деградации биомассы. Деградация биомассы связана со снижением активности микроорганизмов, уменьшением удельной скорости их роста и развития популяции. Как правило, деградация биомассы начинается в полностью работоспособном состоянии биореактора, далее последовательно переводит его в частично работоспособное и неработоспособное. В ряде случаев возможно возникновение аварийных ситуаций, связанных с недопустимыми выбросами загрязнений. Своевременное выявление начальных этапов деградации биомассы дает возможность принятия соответствующих решений и таким образом существенно влияет на эффективность использования системы. К основным факторам, вызывающим деградацию биомассы при анаэробном брожении, относят [3, 4]:

- воздействие высоких концентраций субстрата на биомассу;
- недостаточное питание биомассы;
- разрушение клеточных агрегатов;
- нарушение температурного режима проведения технологического процесса очистки;
- воздействие токсических веществ на биомассу;
- повышенная нагрузка по сточной воде на биореактор, недостаточное время обработки стока.

Разработка алгоритмов анализа ТС, согласно методологии [1, 2], основывается на агрегированной модели анаэробного биореактора как объекта анализа ТС. С учетом отдельных этапов деградации биомассы выделены технические состояния САБО $S_i \hat{=} S, S = \{S_j | j = \overline{1,16}\}$ и диагностические признаки $\rho_j \hat{=} \Pi, \Pi = \{\rho_j | j = \overline{1,19}\}$, включающие как параметры технологического процесса, так и параметры, напрямую или косвенно характеризующие состояние биомассы. Агрегированная модель позволила конкретизировать диагностические признаки при анализе состояния биомассы в САБО и выбрать минимальный набор признаков, удовлетворяющих критериям минимальной стоимости и максимальной информативности проведения проверок. В минимальный набор диагностических признаков при мониторинге состояния биомассы в процессе анаэробной биологической очистки вошли параметры, на основе измерения или вычисления которых можно принять решение о наблюдаемом состоянии биомассы в биореакторе: концентрация загрязнений в очищенной воде S_{out} , производительность системы по биогазу I_G и содержание метана в выработанном биогазе CH_4 , рабочая температура процесса θ , концентрация летучих жирных кислот VFA_{total} и кислотность среды в биореакторе pH , концентрация взвешенных веществ в очищенной воде TSS , производительность системы по сточной воде Q_{in} .

В общем случае состояние микроорганизмов определяется вполне конкретными параметрами: концентрация биомассы в биореакторе B , удельная скорость роста μ и отмирания k_d популяции, скорость потребления субстрата Y_S и производства продуктов метаболизма Y_P , удельная активность метаногенов SMA , которые невозможно измерить напрямую в процессе эксплуатации САБО. Эти параметры могут быть рассчитаны по

косвенным измерениям на основе обобщенной математической модели, предложенной авторами [5], позволяющей учитывать как физические параметры, так и параметры биомассы в установившемся режиме работы биореактора. Обобщенная математическая модель процесса анаэробного брожения в биореакторе может быть записана как (1).

$$\begin{aligned}
 \dot{S}(t) &= f_1(S(t), \mathbf{W}(t)) - r_1(B_1(t), S(t), \mathbf{K}_1(\theta)), \\
 \dot{P}(t) &= f_1(P(t), \mathbf{W}(t)) - r_1(B_2(t), P(t), \mathbf{K}_2(\theta)) + r_2(B_1(t), S(t), \mathbf{K}_1(\theta)), \\
 \dot{G}(t) &= f_2(G(t), \theta(t)) + r_2(B_2(t), P(t), \mathbf{K}_2(\theta, pH)), \\
 \dot{B}_1(t) &= f_3(B_1(t), Q(t), \mathbf{W}(t), \theta(t)) + r_3(B_1(t), S(t), \mathbf{K}_1(\theta, pH)), \\
 \dot{B}_2(t) &= f_3(B_2(t), Q(t), \mathbf{W}(t), \theta(t)) + r_3(B_2(t), P(t), \mathbf{K}_2(\theta, pH)), \\
 \dot{\theta}(t) &= f_4(\theta(t), \mathbf{W}(t)), \\
 \dot{\mathbf{W}}(t) &= f_5(\mathbf{W}(t), Q(t), p(t)).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь функции $f_1 - f_5$ описывают физические процессы в анаэробном биореакторе, и их вид во многом определяется его конструктивным исполнением. Функции $r_1 - r_3$ определяют биохимические процессы при анаэробной очистке сточных вод: разложение органического вещества (r_1), образование продуктов микробиологической реакции (r_2) и рост популяции микроорганизмов (r_3). Векторы \mathbf{K}_1 и \mathbf{K}_2 представляют собой набор кинетических параметров, характеризующих особенности жизнедеятельности различных групп микроорганизмов в анаэробной популяции. Эти параметры зависят от видового состава биомассы, условий ее развития и жизнедеятельности, в наибольшей степени – от температуры θ в рабочей зоне биореактора. Форму существования клеточных агрегатов, интенсивность протекания массообменных процессов определяет поле скоростей газо-жидкостных потоков в биореакторе \mathbf{W} . На основе обобщенной математической модели анаэробного биореактора (1) разработана имитационная модель в виде отдельного программного модуля в системе MATLAB [6]. Основное назначение этой модели – использование для оценки состояния биомассы в системах управления технологическим процессом при непрерывном контроле ТС биореактора. Имитационная модель может так же использоваться на этапах проектирования биореактора и пуско-наладочных работ САБО. Общая структура модуля расчета параметров анаэробного биореактора, реализующего численное решение обобщенной математической модели (1) для конкретной конструкции аппарата, приведена на рис. 2.

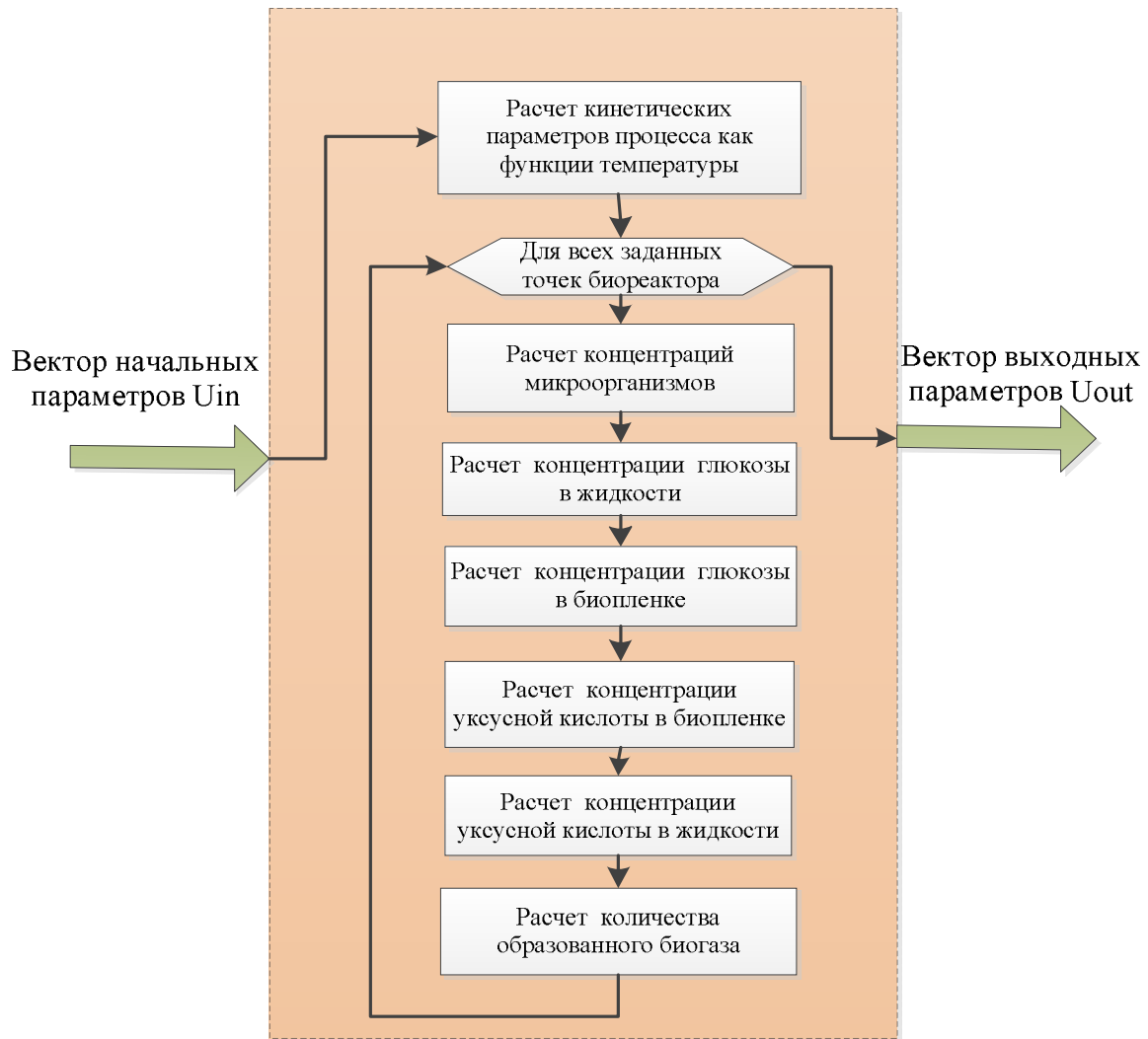


Рис. 2. Общая структура модуля имитационного моделирования биореактора

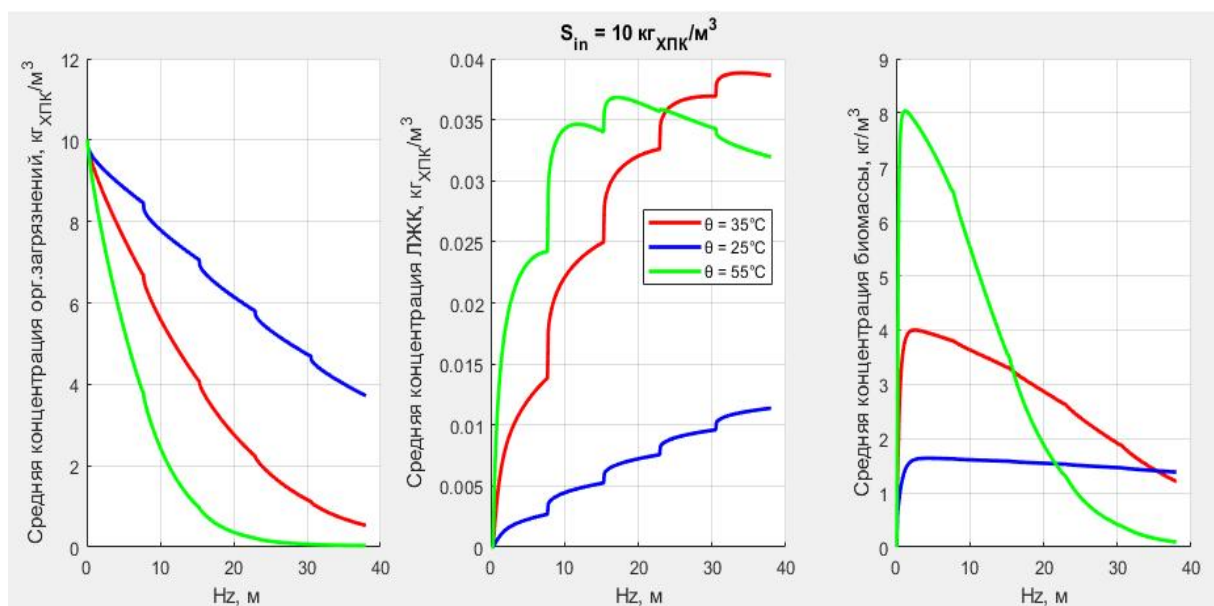


Рис. 3. Результаты исследования деградации биомассы на имитационной модели для начальной концентрации сточной воды $S_{in} = 10 \text{ кг ХПК/м}^3$

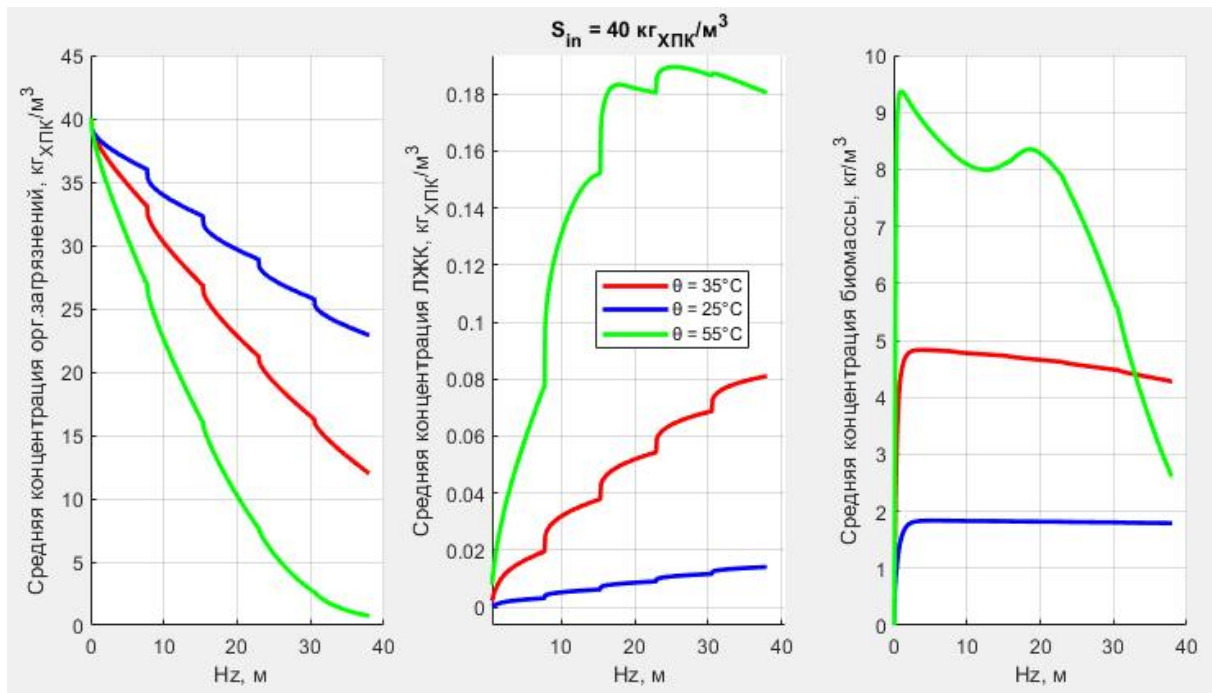


Рис. 4. Результаты исследования деградации биомассы на имитационной модели для начальной концентрации сточной воды $S_{in} = 40 \text{ кг ХПК/м}^3$

На рис. 3 и рис. 4 приведены результаты расчетов параметров анаэробной очистки сточных вод в секционном биореакторе на разработанной имитационной модели. Исследования проводились для трех температурных режимов анаэробного брожения: мезофильного (35°C), психрофильного (25°C) и термофильного (55°C). В результате, для невысоких концентраций субстрата (рис. 3) наблюдается падение концентрации биомассы в биореакторе в виду недостаточности питания, что особенно выражено для наиболее интенсивного термофильного режима очистки. Перегрузка биореактора по органическому веществу (рис. 4) для психрофильного режима не приводит к резкому росту концентрации органических кислот, замедляющих рост биомассы. Однако ввиду ингибирования субстратом не происходит и роста концентрации биомассы. С ростом начальной концентрации загрязнений при высоких температурах происходит быстрое накопление органических кислот, которое приводит к резкому падению активности биомассы. При меньших температурах, для которых характерны более низкие скорости разложения загрязнений, образованные органические кислоты успевают перерабатываться и не оказывают ингибирующего воздействия на биомассу.

Выводы

Современные подходы к эксплуатации локальных систем очистки сточных вод предприятий требуют непрерывного контроля технического состояния очистных сооружений. Использование биологических методов очистки выдвигает на первый план непрерывное оценивание состояния биомассы, которое реально может быть выполнено только с помощью методов имитационного моделирования в общей схеме системы автоматизированного управления технологическим процессом очистки.

Предложенное имитационное моделирование процессов в анаэробных биореакторах основано на обобщенной математической модели, учитывающей особенности как физических, так и биологических процессов, и позволяет существенно повысить эффективность принятия решений при эксплуатации САБО предприятий пищевой промышленности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ № 20-08-00747.

Литература

1. **Дмитриев А.К.** Идентификация и техническая диагностика / А. К. Дмитриев, Р. М. Юсупов – Министерство обороны СССР, 1987. 521 с.
2. **Копкин Е.В.** Анализ технического состояния космических средств / Е.В. Копкин, А.Н. Кравцов, В.В. Мышко. СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. 190 с.
3. **Pezhman Kazemi, Christophe Bengoa, Jean-Philippe Steyer, Jaume Giralt.** Data-driven techniques for fault detection in anaerobic digestion process // *Process Safety and Environmental Protection*. 146(2021). Pp. 905-915.
4. **Laurent Lardon, Ana Punal, Jean-Philippe Steyer.** On-line diagnosis and uncertainty management using evidence theory—experimental illustration to anaerobic digestion processes // *Journal of Process Control* 14 (2004). Pp. 747-763.
5. **Ключарёв А.А., Фоменкова А.А.** Проектирование секционного анаэробного биореактора // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2018. № 34 (60). С. 95-100.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021613417. Программный модуль для имитационного моделирования системы анаэробной очистки сточных вод. А.А. Фоменкова, А.А. Ключарёв. №2021612722, заявл. 09.03.2021.