МРНТИ 87.53.91; 70.25.00 https://doi.org/10.26577/EJE208830226

Н.К. Булатов*, А.Б. Ахметжанова, К.С. Касымжанова, С.З. Елюбаев, О.Ш. Оразов

Кокшетауский университет им. А. Мырзахметова, Кокшетау, Казахстан
*e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕЖИМАМИ В ПРОЦЕССЕ БИОГАЗОВОГО ТОПЛИВА

Данная статья представляет исследование по выявлению эффективной переработки органических отходов со сточных вод и получения качественного биогазового топлива, путем оптимального математического моделирования и выстраивания алгоритма автоматического управления переходами температурных режимов между мезофильным (35–40°C) и термофильном (50–55°C), при анаэробном сбраживании (АС) из сточных вод производительным объемом 10 м^3/сутки на малой биогазовой установке с выходом метана. Для анаэробного сбраживания применяется субстрат со смесью первичного и вторичного осадков от очистного сооружения (ОСВ), размещенного к строению в городе Кокшетау (Казахстан) с подсоединением к городской канализационной сети. Данный субстрат имеет показатели ХПК 2500 ÷ 3000 мг/л и содержит органические вещества 60–80% от сухого вещества. Кинетическая модель построена с включением четырех независимых ингибиторных функций, таких как, температурная (Моно-Аррениус), pH, свободного аммиака (NH_3) и летучих жирных кислот (ЛЖК). Алгоритм управления реализуется пятью уровнями приоритета с защитным периодом охлаждения 15 суток, с темпом изменения температуры 5 суток. Полученные результаты верифицированы по 34 критериям с показаниями 100%-го соответствия нормам. Биогазовая установка при данной производительности обеспечила выработку электрической мощности при мезофильном режиме 1,5–2 кВт и при термофильном режиме доходит до 2,4 кВт с приростом на 33%. Осадки субстрата с повышенным содержанием белкового азота при работе по данному алгоритму обеспечивает своевременное предотвращение ингибирование аммиаком и тем самым, обеспечивает бесперебойную и равномерную работу биогазовых установок с выходом качественного метана.

Ключевые слова: анаэробное сбраживание, осадки сточных вод, термофильный режим, мезофильный режим, качественный биогаз, математическое моделирование, автоматическое управление, летучие жирные кислоты, аммиак, биогазовая установка.

N.K. Bulatov*, A.B. Akhmetzhanova,
K.S. Kasymzhanova, S.Z. Yelyubaev, O.S. Orazov

A. Myrzakhmetov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan
*e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com

Mathematical modeling and algorithm of temperature control in the biogas fuel process

This article is a study on the identification of effective processing of organic waste from wastewater and the production of high–quality biogas fuel, through optimal mathematical modeling and expression of an algorithm for automatic control of temperature transitions between mesophilic (35-40 ° C) and thermophilic (50-55 °C), during anaerobic digestion (AC) from wastewater. with a productive volume of 10 m3/day in a small biogas plant with methane output. For anaerobic digestion, a substrate with a mixture of primary and secondary precipitation from a sewage treatment plant located for construction in the city of Kokshetau (Kazakhstan) with connection to the urban sewerage network is used. This substrate has cod values of 2500 - 3000 mg/l and contains organic substances of 60-80% of the dry matter. The kinetic model is constructed with the inclusion of four independent inhibitory functions, such as temperature (Mono-Arrhenius), pH, free ammonia (NH_3) and volatile fatty acids (VFA). The control algorithm is implemented by five priority levels with a protective cooling period of 15 days, with a temperature change rate of 5 days. The results were verified according to 34 criteria with indicators of 100% compliance with (Verein Deutscher Ingen, 2016; IEA Bioenergy, 2023; Metcalf et al., 2014; Mao et al., 2015). At this capacity, the biogas plant provided electrical power generation in the mesophilic mode

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

of 1.5 – 2 kW and in the thermophilic mode it reached 2.4 kW with an increase of 33%. Precipitation of a substrate with a high content of protein nitrogen when working according to this algorithm ensures timely prevention of ammonia inhibition and thereby ensures uninterrupted and uniform operation of biogas plants with high-quality methane output.

Keywords: anaerobic digestion, sewage sludge, thermophilic regime, mesophilic regime, high-quality biogas, mathematical modeling, automatic control, volatile fatty acids, ammonia, biogas plant.

Н.Қ. Болатов*, А.Б. Ахметжанова,
Қ.С. Касымжанова, С.З. Елюбаев, О.Ш. Оразов
А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан
*e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com

Биогаз отыны процесінде температуралық режимдерді басқарудың математикалық модельдеуі және алгоритмі

Бұл мақала ағынды сулардан органикалық қалдықтарды тиімді өңдеуді анықтау және оңтайлы математикалық модельдеу және мезофильді (35 – 40°C) және термофильді (50 – 55°C) арасындағы температуралық режимдердің ауысуын автоматты басқару алгоритмін білдіру арқылы сапалы биогаз отынын алу, ағынды сулардан анаэробты ашыту (ас) кезінде зерттеу болып табылады. Метан шығатын шағын биогаз қондырғысының өнімділігі тәулігіне 10 м^3. Анаэробты ашыту үшін қалалық кәріз желісіне қосыла отырып, Көкшетау қаласында (Қазақстан) құрылысқа орналастырылған тазарту құрылысынан (ОСВ) бастапқы және қайталама қалдықтар қоспасы бар субстрат қолданылады. Бұл субстрат 2500 ÷ 3000 мг/л HDL көрсеткіштеріне ие және құрамында құрғақ заттың 60-80% органикалық заттар бар. Кинетикалық модель температура (Моно-Аррениус), pH, бос аммиак (NH_3) және ұшпа май қышқылдары (LFK) сияқты төрт тәуелсіз ингибиторлық функцияларды қосумен құрылған. Басқару алгоритмі басымдықтың бес деңгейімен, салқындату кезеңі 15 тәулікпен, температураның өзгеру қарқыны 5 тәулікпен жүзеге асырылады. Алынған нәтижелер осы (нормаларға 100% сәйкестік көрсеткіштерімен 34 критерий бойынша тексерілді. Биогаз қондырғысы осы өнімділікпен 1,5 – 2 кВт мезофильді режимде электр қуатын өндіруді қамтамасыз етті және термофильді режимде 33% өсіммен 2,4 кВт-қа жетті. Осы алгоритм бойынша жұмыс істеу кезінде ақуыз азотының мөлшері жоғары субстраттың тұндырылуы аммиакпен тежелудің уақтылы алдын алуды қамтамасыз етеді және сол арқылы сапалы метанның шығуымен биогаз қондырғыларының үздіксіз және біркелкі жұмысын қамтамасыз етеді.

Түйін сөздер: анаэробты ашыту, ағынды сулардың жауын-шашыны, термофильді режим, мезофильді режим, сапалы биогаз, математикалық модельдеу, автоматты басқару, ұшпа май қышқылдары, аммиак, биогаз қондырғысы.

Введение

Выбор температурных режимов анаэробного сбраживания достаточно изучен и как у мезофильного, так и у термофильного режимов по температуре имеются свои преимущества и недостатки. Правильное совмещение данных температурных режимов с переключением в необходимый момент является малоизученным и имеет потенциал по усовершенствованию прохождения анаэробного процесса с эффективными выходами данных, что придает актуальность данному исследованию. Целью данного исследования является определение математической модели и алгоритма управления температурными режимами в процессе анаэробного сбраживания с выходом качественного биогазового топлива и бесперебойной работы биогазовой установки. Ключевой элемент очистки городских сточных вод с выведением осадков для образования субстрата проходящий анаэробное сбраживание представлен биогазовым установкам. Объем образуемых осадков городских станций аэрации по Республике Казахстан, в совокупности превышает 2,5 млн тонн в год относительно сухого вещества. Из них не более 15% только проходят утилизацию с извлечением энергии (Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan, 2023). В стране к 2030 году до 15% предусмотрено увеличить долю возобновляемых источников энергии согласно государственной программе «Жасыл Қазақстан», а проекты анаэробного сбраживания осадков сточных вод биогазовыми установками представляются наиболее экономически доступными и перспективными в достижении данных показателей с попутным достижением значительного снижения органических отходов, углеродного следа и повысить качество пользования воды.

Осадок сточных вод от городских очистных сооружений является гетерогенным субстратом с широким диапазоном вариабельности состава. В составе первичного осадка преобладают легкодоступные углеводы и жиры, а во вторичном, так называемом активном иле преобладает белковый азот, который влияет на риски образования аммиачного ингибирования при термофильном режиме. Предприятия легкой и пищевой промышленности, связанные с переработкой и выбросом осадков в сточные воды городской канализации создают дополнительные условия по увеличению органической нагрузки и концентрации летучих жирных кислот. Данные динамические условия приводят к нестабильности процесса при фиксированных температурных режимах анаэробного сбраживания (Kwon et al., 2019; Government of the Republic of Kazakhstan, 2021).

Разработка алгоритмов автоматического переключения температурных режимов в процессе анаэробного сбраживания и производства биогаза является актуальной задачей, так как большинство оперативного персонала очистных станций не только Казахстана, но и в мире, не располагают как реагировать по формализованным протоколам на резкие отклонения параметров анаэробного сбраживания и регулирование влияния их на выход качественного биогаза. Системы SCADA, которые используются в контроле данных процессов, в основном ограничиваются мониторингом температуры в определенном одном режиме и общего объема выделяемого биогаза, который не учитывает совокупное ингибирующее воздействие летучих жирных кислот и NH_3. Данные не учеты и являются часто причиной аварийной остановки и сбоя работы биогазовых установок, образуя закисление реактора (Angelidaki et al., 2009).

Данная работа направлена на достижение цели по разработке и верификации математической модели кинетики развития метаногенеза в органических отходах осадков сточных вод с учетом многофакторных функций ингибирования, а также выстроить правильный алгоритм автоматического управления температурными режимами с своевременным переключением на нужный диапазон. Научной новизной работы являются:

- при любых концентрациях субстрата обеспечивается строгая монотонность через применяемости экспоненциальной модели ингибирования летучих жирных кислот;

- интеграция в единую иерархическую логику управления пятью независимыми ингибиторными функциями;

- адаптация к специфике осадка сточных вод параметров модели, как субстрат, имеющий переменное содержание белкового азота.

Материалы и методы

Параметры субстрата и эксплуатационные характеристики установки

Исходными данными для моделирования объекта являются следующие:

- биогазовая установка одноступенчатая с подачей субстрата непрерывном виде (CSTR), которая получает рабочую смесь первичным осадком 40% по массе и вторичным осадком в виде избыточного активного ила 60% по массе от очистного сооружения сточных вод производительностью 10 $м^3$/сутки подсоединенная к городским системам водоотведения. Данный комплексный объект по очистке сточных вод, биогазовой установкой и электрическим генератором номинальной мощности 2 кВт и максимальной мощности 2,5 кВт, размещен на территории Кокшетауского университета имени А. Мырзахметова. Данный класс установок типичны для малых локальных хозяйств и предприятий с собственной системой водоотведения (Angelidaki et al., 2009);

- субстрат с основными характеристиками при указанной производительности ХПК – 2500 ÷ 3000 мг/л с содержанием осадков сточных вод 65 ÷ 75% от СВ, общим азотом 40 ÷ 80 гН/кгСВ (30 ÷ 50% из которых – насыщен органическим азотом белкового происхождения), жирами 15 ÷ 25% от ОВС. При этом, в базовом сценарии органической нагрузкой Q_C = 2,5 кгХПК/$м^3$•сутки, с суточным объемом подачи субстрата определяемый по условиям поддержания заданного ГВУ = 20 сутки при мезофильном и 15 суток при термофильном режиме (гидравлическое время удержания). Это соответствует $V_P \approx 150 \div 200$ $м^3$ – рабочий объем реактора. Данные по операционным параметрам для мезофильного и термофильного режимов приведены в таблице 1.

Таблица 1
Данные по операционным параметрам температурных режимов анаэробного сбраживания осадков сточных вод

Параметр	Единица измерения	Мезофильный режим	Термофильный режим	Источник
Температурный диапазон	°C	35 ÷ 40	50 ÷ 55	(Verein Deutscher Ingen, 2016)
Температура оптимального значения	°C	37	53	(Verein Deutscher Ingen, 2016)
pH диапазоны	-	6,8 ÷ 7,5	7,0 ÷ 7,8	(Metcalf & Eddy, et al. 2014)
CH_4 выход эталонный	$м^3$/кгХПК	0,45	0,6	(IEA Bioenergy, 2023)
Уровень летучих жирных кислот (ЛЖК) предельный	мг/л	2000	3000	(Mao et al., 2015)
Уровень NH_3 предельный	мг/л	1500	800	Sprott & Patel, (1986)
Время удержания гидравлическое	сут	20	15	(Verein Deutscher Ingen, 2016)
Органическая нагрузка максимальная	кгХПК/ $м^3$•сутки	3,5	6,0	(Metcalf & Eddy, et al. 2014)
Длительность перехода	сут	5	5	(Batstone D.J., et al. 2002)
Осадок сточных вод ХПК	мг/л	2500 ÷ 3000	2500 ÷ 3000	(Metcalf & Eddy, et al. 2014)
Содержание ОВС осадка	% от СВ	60 ÷ 80	60 ÷ 80	(WEF, 2012)
Примечание: составлено автором на основе данных приведенных в источниках				

Математическая модель кинетики развития метаногенеза в органических отходах из осадков сточных вод

Суммарной биологической активностью консорциума процесса метаногенеза $\varepsilon(t)$ дается описание состоящая из произведения четырех независимых функция ингибирования:

$$\varepsilon(t) = f_T \cdot f_{pH} \cdot f_{ЛЖК} \cdot f_{NH_3}, \quad (1)$$

Базой функции температуры f_T является модифицированное уравнение Моно-Аррениуса, в которой отражена гауссовая нормировка по отношению к оптимальной температуре T_{opt}:

$$f_T = exp\left[-0{,}5 \cdot \left(\left(T - T_{opt}\right)/\sigma_T\right)^2\right],$$
$$\sigma_T = (T_{max} - T_{min})/2, \quad (2)$$

Моделирование pH-ингибирования осуществляет линейная функция насыщения, в которой большая чувствительность метаногенов к закислению отражена несимметричностью, с наличием крутизны 3,0 ниже и 2,0 выше оптимума:

$$f_{pH} = max\{0 * \ 1 - 3 \cdot (pH_{min} - pH)\},$$
$$\text{при } pH < pH_{min}, \quad (3)$$

С учетом всего диапазона концентрации осадков сточных вод обеспечивающая строгую монотонность экспоненциальная функция убывания описывает ингибирование летучих жирных кислот (полиномиальные модели насыщаются при $c < c_{max}$, что отличают от данной функции):

$$f_{ЛЖК} = exp\left[-2{,}5 \cdot (c_{ЛЖК}/c_{max} - 0{,}5)\right],$$
$$\text{при } c_{ЛЖК} > 0{,}5 \cdot c_{max}, \quad (4)$$

Взаимосвязь мгновенного выхода биогаза $Y(t)$ и потока (CH_4) метана – $Q_{CH4}(t)$ выражается следующими соотношениями:

$$Y(t) = Y_{ref} \cdot \varepsilon(t) \cdot \xi(t);$$
$$Q_{CH4}(t) = \left(Q_s \cdot V_p \cdot Y(t)\right)/24, \quad (5)$$

где Y_{ref} – удельный (эталонный) выход метана CH_4 ($м^3$/кгХПК); V_p – объем рабочего реактора (параметр модели масштабирования), $м^3$; $\xi(t)$ – случайный компонент Гаусса $\sigma = 4\%$, который имитирует флуктуацию состава осадка сточных вод.

Алгоритм автоматического управления переходами температурных режимов

Реализация алгоритма построена на иерархической системе с 5-ю уровнями приоритета.

Оценка условий последовательном порядке производится на каждом шаге $\Delta t = 1$ сутка:

1. Критический: баланс уровня pH < 6,5 или при летучих жирных кислотах $c_{ЛЖК} > 1{,}5 \cdot c_{max} \rightarrow$ необходимо выполнение принудительного возврата в мезофильный режим. Определение данного порога исходит из необратимости подавления метаногенов ацетокластического характера при уровне pH когда ниже 6,5 в условиях осадков сточных вод (Batstone et al., 2002);

2. Срочный: $c_{NH3} > 0{,}8NH_3 max$ при режиме термофильной температуры → принудительное возвращение в мезофильный режим. 0,8 – это 80% порог в соответствии начала ингибирования при уровне $f_{NH3} = 0{,}36$. Это приводит к эмпирическому коррелированию со снижением выхода метана CH_4 в диапазоне 20 – 35% (Hansen et al., 1998);

3. Эффективность: $\eta_{КПД} < 0{,}65$ (то есть 65%) → происходит оценивание целесообразности необходимости смены режима учитывая текущую стабильность $t_{стаб} \geq 7$ суток;

4. Оптимизация: $\eta_{КПД} < 0{,}92$ при мезофильном режиме, а $t_{стаб} < 7$ суток и $c_{NH3} < 0{,}7NH_3 max_termo \rightarrow$ необходимо осуществление перехода на термофильный режим, что максимизирует выработку биогаза (метана);

5. Защитный период: защитный период охлаждения 15 суток между разными переключениями, градиент темпа изменения температуры ≤ 3 °C/сутки (целевое T достигает за 5 суток).

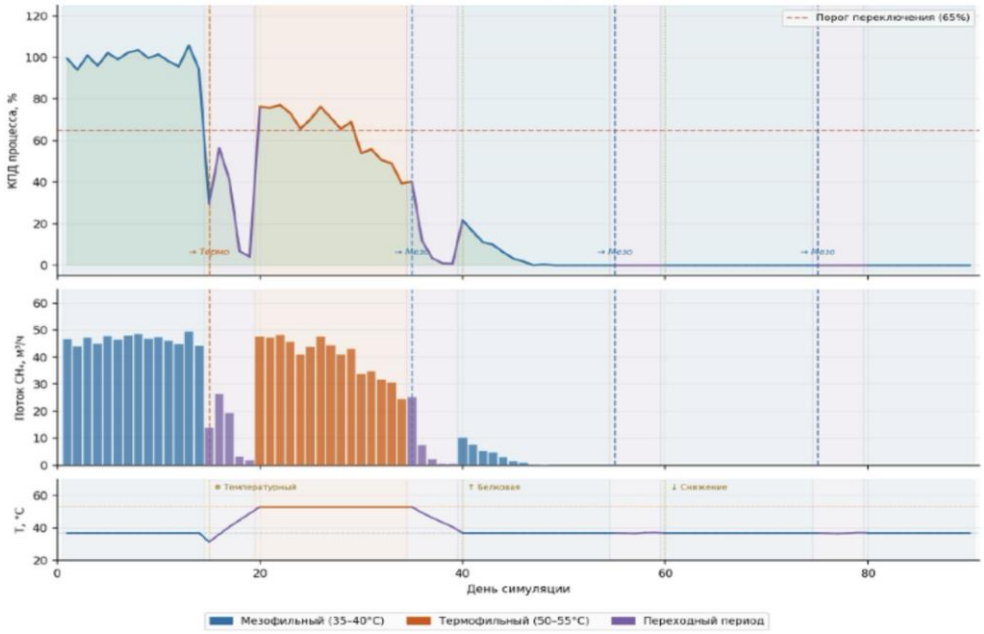
Результаты и их обсуждение

Динамика построения основных параметров и порядок переключения режимов

Сводную динамику КПД процесса в %-ах, объемный поток CH_4 в $м^3/ч$ и за период симуляции 90 суток изменение температуры реактора приведены на рисунке 1. Типично для очистных сооружений в реальности воспроизводится сценарий основанный на 3-х характерных возмущениях: реактор внезапно приводится к охлаждению (на 15-ый день имитирование аварию теплообменника), идет сброс в сток от пищевых предприятий с поступлением высококонцентрированного белка (на 40-ой день) и при условиях профилактической работы идет снижаемость подачи осадка (что продемонстрировано на 60-ый день).

Рисунок 1

Динамика изменения $\eta_{КПД}$, объемный поток CH_4 и температуры реактора в процессе анаэробного сбраживания осадков сточных вод



Сценарии: день 15 – авария теплообменника; день 40 – поступление насыщенного белкового стока; 60 день – снижаемость подачи.

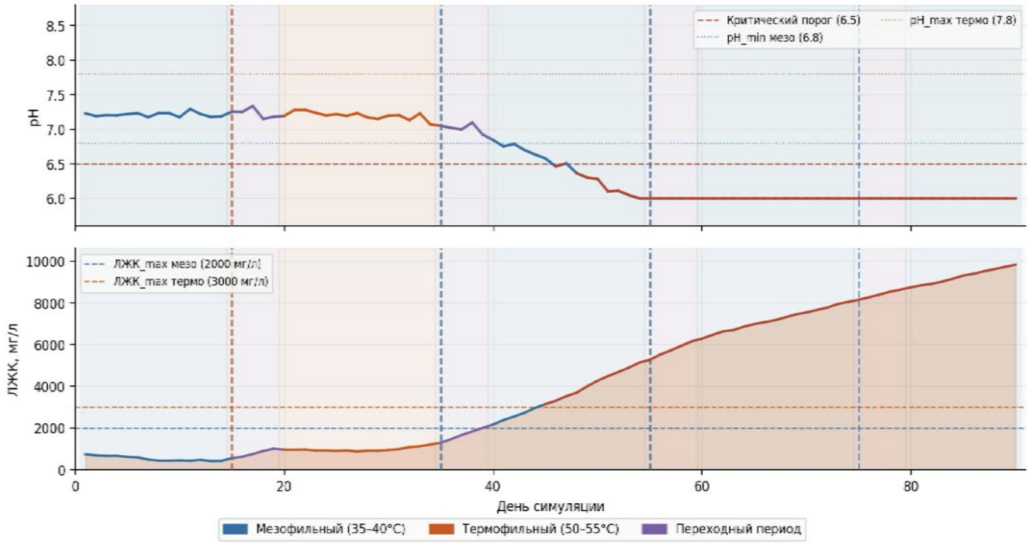
Синие линия и столбы – мезофильный режим, оранжевые линия и столбы – термофильный режим, фиолетовые линия и столбы – периоды перехода.

В промежутке дней 1 -14 (начальный период) биогазовый реактор функционирует начиная с мезофильного режима с $\eta_{КПД} = 0{,}97 \div 1{,}07$ и потоком метана CH_4 $Q_{CH4}(t) = 0{,}49 \div 0{,}53$ м^3/ч в соответствии электрической мощности когенерационного генератора 1,7 ÷ 1,9 кВт. Нормативное значение летучих жирных кислот и уровень pH в данной ситуации выдерживается. На 15-ый день происходит аварийная ситуация с теплообменником, что приводит к снижению температуры реактора ниже оптимума на 5 – 8 °C, что приводит к уменьшению температурного фактора f_T до значения 0,21, что в свою очередь влечет к падению КПД на значение ниже 65%, в последствии инициируется переключение на термофильный режим. В промежутке дней 15 – 19 идет снижение до $\eta_{КПД} = 0{,}04 \div 0{,}57$, что является следствием нахожденности микробиоты в промежуточном диапазоне нефизиологического характера 40 – 50 °C.

На день 20 происходит стабилизация при T = 53°C, что соответствует термофильному режиму с $\eta_{КПД} = 0{,}51 \div 0{,}69$. При переходе с мезофильного режима занимающее 15 – 20 суток идет значение по показателям ниже теоретического оптимума которое имеет объяснение незавершенностью адаптации ацетокластических архей – процессом. На день 35 нарастание аммиака NH_3 до значения 680 мг/л (то есть от порога 800 мг/л 80%) приводит к активизации срочного возврата на мезофильный режим.

Рисунок 2

Динамика изменения pH уровня (верхний график) и содержание летучих жирных кислот (нижний график) при анаэробном сбраживании осадков сточных вод



Пунктирные красные линии – критические пороги для переключения

Динамика изменения летучих жирных кислот и уровня pH во взаимосвязи при анаэробном сбраживании осадков сточных вод продемонстрировано на рисунке 2. В начальном периоде летучих жирных кислотах происходит снижение со значения 737 до 372-ух мг/л, чему воздействовало высокая метаногенная активность. Поступление на 40-ой день белкового стока приводит аммиак NH_3 к росту до резких значений 1194 мг/л. Это дестабилизирует метаногенный консорциум и приводит к ослаблению утилизации летучих жирных кислот запускающее каскадное накопление. Далее на 55-ый день летучие жирные кислоты уже в значениях превышения 5000 мг/л. В свою очередь, уровень pH снижается до значений 6,0, что критично.

Эта динамика четко описывает воспроизведение реального механизма нестабильной работы биореактора осадка сточных вод, что описано у Couder et al. (2019): высококонцентрированный белковый субстрат с одновременным притоком осуществляет поставку ингибитора NH_3 вместе с питательной средой для ацидогенных бактерий. В последствии происходит превышение

скорости прироста гидролиза и ацидогенеза, который временно опережает скорость развития метаногенеза сопутствующая положительной обратной связи по закислению. По алгоритму инициируются переключения на дни 55 и 75 для стабилизации процесса, но необходимо снижение органической нагрузки для восстановления эффективного сохранения процесса анаэробного сбраживания для прививания для следующих потоков осадков сточных вод.

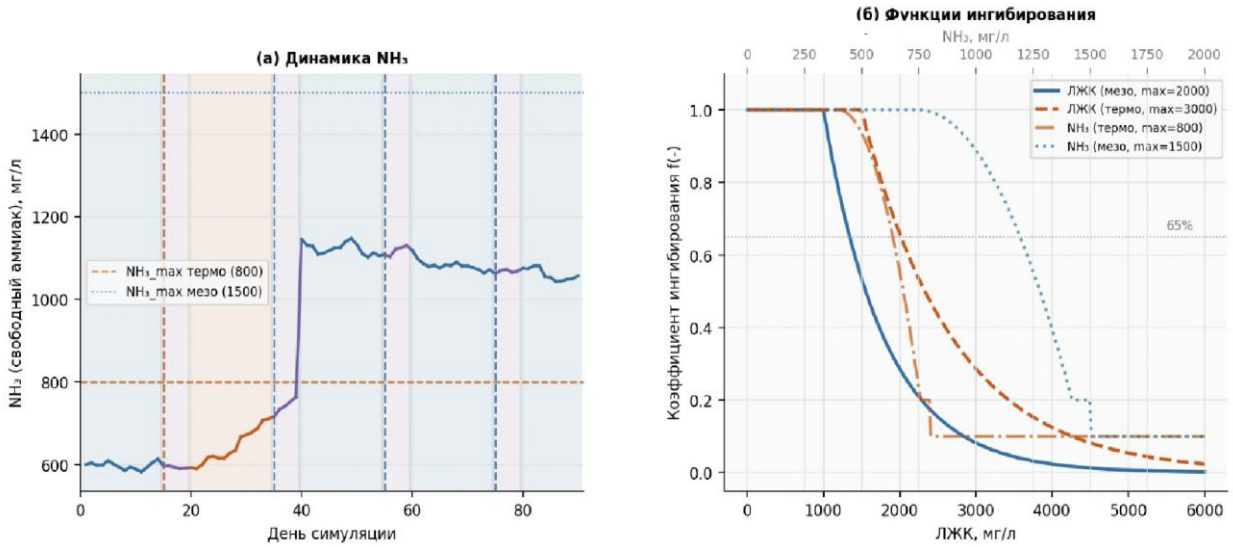
Процесс аммиачного ингибирования при анаэробном сбраживании в осадках сточных вод белковых фракций

На рисунке 3, а показано, что в промежутке дней 20 – 39 при термофильном режиме идет сопровождение непрерывного роста аммиака NH_3 в диапазоне 652 ÷ 691 мг/л. Данную тенденцию обуславливают два фактора: первое – ускоренный гидролиз белков осадков сточных вод при термофильном режиме T = 53 °C по сравнению с мезофильным режимом T = 37 °C; второе – сдвиг равновесия NH_4^+ / NH_3 в зависимости от повышения температуры в сторону свободной формы токсичности. Уравнение Хансена (Hansen et al., 1998) дает основание, что в аммонийном азоте общего содержания доля свободного аммиака NH_3 3 – 5 раз превысит при параметрах T = 53 °C и уровня pH = 7,3 относительно температуры 37 °C.

На рисунке 3, б количественно демонстрируется ассиметрия чувствительности ингибирования на температурный режим: при $c_{NH_3} = 900$ мг/л аммиака по консорциуму коэффициента активности термофильного режима составляет $f = 0{,}1$ при полном ингибировании, а при мезофильном режиме $f = 0{,}96$. Это различие фундаментального характера дает определение по ключевому ограничению термофильного сбраживания осадков сточных вод с содержанием высокого концентрата органического азота: для достижения более высокой продуктивности по получению качественного биогаза на потенциальном уровне, необходим строгий контроль азотного баланса в субстрате.

Рисунок 3

Аммиачное ингибирование при анаэробном сбраживании с функцией подавления микробиоты



а) динамика изменения свободного аммиака (NH_3) при анаэробном сбраживании осадков сточных вод;
б) функции подавления микробиоты (ингибирования) летучими жирными кислотами и аммиаком (NH_3) при мезофильном и термофильном режимах

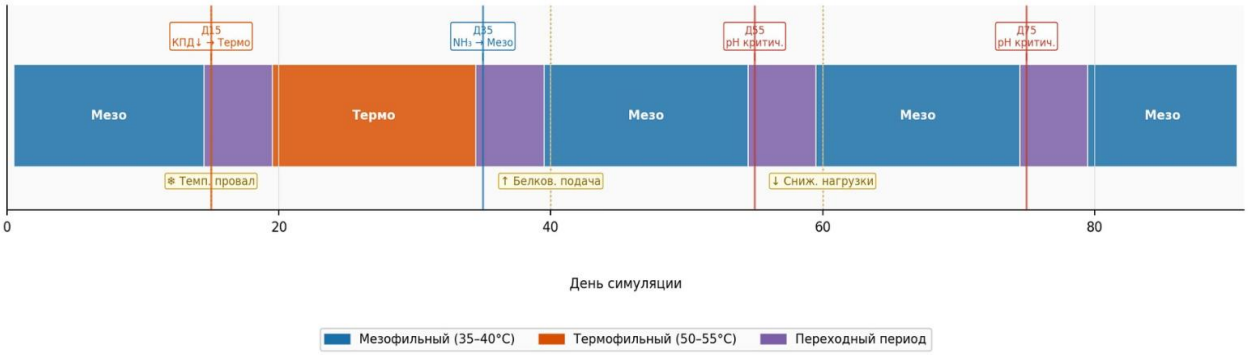
Шкала по времени и порядок событий по управлению

Вырабатываемые от очистки сточных вод производительностью 10 $м^3$/сутки осадки сточных вод на биогазовом реакторе начинает проходить процесс анаэробного сбраживания с мезофильного режима по температуре в течение первых 15 суток, для сбалансированного прохождения метаногенеза с наибольшим ростом анаэробных бактерий и планомерного разгона выхода метана CH_4. Далее в течение 5 дней происходит плавный переход к термофильному режиму по температуре, в период действия которого происходит наибольший выход метана CH_4 высокого качества. После термофильного режима в течение следующих 5 дней необходимо осуществление перехода к обратно к мезофильному режиму для сохранения баланса в составе субстрата от закисания.

Весь порядок событий управления по времени в течение 90 суток анаэробного сбраживания в биореакторе систематизирован и представлен на рисунке 4 и в таблице 2.

Рисунок 4

Шкала по времени переключения режимов при анаэробном сбраживании в течение 90 суток



Линии по вертикали – события по переключению на временном отрезке; пунктирные линии желтого цвета – технологические возмущения.

Таблица 2

Порядок событий по переключению температурных режимов за период симуляции в течение 90 суток

День	Событие	Переход с режима	Переход на режим	Причина перехода	Приоритеты
15	Переключение	Мезофильный, 37 °C	Термофильный, 53 °C	Падение температуры → КПД<65%	Нормальный
20	Завершение	-	Термофильный, 53 °C	Достижение T = 53 °C	-
35	Переключение	Термофильный, 53 °C	Мезофильный, 37 °C	NH_3 > 640 мг/л	Срочный
40	Перегрузка ХПК	-	Мезофильный, 37 °C	Концентрация осадка ↑NH_3	Сценарий
55	Автоматическое стабилизирование	Мезофильный	Мезофильный	pH<6,5 (критический)	Критичный
60	Снижение подачи	-	-	Оператором снижена органическая нагрузка активного ила	Сценарий
75	Автоматическое стабилизирование	Мезофильный	Мезофильный	pH<6,5 (критический повторно)	Критичный

Примечание: составлено автором на основе данных приведенных в источниках

По результатам видно, что по алгоритму идет корректная реакция на все 3 типа нарушений: по температурному режиму на 15-ый день с реакцией нормального приоритета, по аммиачному скачку на 35-ый день срочного приоритета и критического приоритета на 55-ый и 75-ый дни по pH-закислению. Выстроенность последовательности событий анаэробного сбраживания дает подтверждение, что процесс ухудшается в каскадном виде не от недостатка в построении алгоритма, а из-за отсутствия должной коррекции по составу субстрата – что вполне приемлемо по сценарию для реальных очистных сооружений.

По полученным результатам выявляются противоречия на фундаментальном уровне связанное с содержанием белка на высоком уровне при анаэробном сбраживании осадков сточных вод: субстраты с высоким содержанием жиров и белков обладают высоким потенциалом выхода метана CH_4 при первичном утверждении, но при этом выясняется, что такой субстрат подвержен к нестабильности и чувствительности к ингибированию аммиака при термофильном режиме. Это состояние нестабильности и сложности контроля при термофильном режиме объясняет частую применяемость биогазовых установок работающих при мезофильном режиме на действующих объектах по очистке сточных вод в Казахстане и мире, с наличием изредка применения установок на термофильном режиме имеющие возможность быстрого сброса обратно в стоки нестабильного субстрата для нового забора осадков сточных вод или игнорирование не эффективной работы биогазовой установки с декларированием скачковых преимущественных показателей термофильного режима.

Сравнивая с результатами (Metcalf & Eddy, 2014), а также (Jenkins et al., 1991) получаем подтверждаемость, того, что по предложенными математической модели и алгоритму адекватно воспроизводится следующее: 1) снижение КПД субстрата из осадков сточных вод КПД до 4 – 12% с темпом изменения температуры 5 суток в переходной период; 2) реалистичная динамика накопления летучих жирных кислот после осуществления перегрузки на 10 – 15 суток характерного времени; 3) асимметрия ингибирования аммиака NH_3 между режимами. Настоящая работа обладает ключевым вкладом по применению экспоненциальной формулы ингибирования летучих жирных кислот (уравнение (4)) взамен лишенной монотонности при данных $c > c_{max}$ полиноминальной широкого применения.

Малые очистные сооружения, имеющие производительность порядка 10 м^3/сутки в ходе практической реализации должны следовать следующему оперативному регламенту: обеспечивающий на выходе 2 – 2,4 кВт электроэнергии термофильный режим необходимо применять при доле избыточного активного ила в субстрате, когда составляет до 50% по органическому веществу субстрата (ожидаемо $c_{NH3} < 600$ мг/л); при возникновения ситуации по превышению доли избыточного активного ила или поступления пищевых стоков с высоким содержанием органического белкового азота необходимым приоритетом обладает мезофильный режим с выходом метана на 1,5 – 2 кВт, при этом контролировать уровень аммиака NH_3 необходимо каждые 48 часов. Предлагаемый алгоритм допускает необходимость интеграции системы SCADA через применение стандартного протокола Modbus TCP/IP.

Ограничения по данному исследованию: 1) модель не учитывает разделение гидролиза, ацидогенеза и ацитогенеза самостоятельными кинетическими шагами типа упрощением ADM1 (Anaerobic Digestation Model №1); 2) коэффициент $\xi(t)$ не берет в учет наличия вариабельности состава осадка сточных вод по сезону на данном этапе исследования (так как исследования по сезону года продолжаются); 3) упрощенной форме моделируются теплопотери реактора. Данные аспекты обуславливаются продолжающимися исследованиями с применением модели ADM1 в полном виде с включением 26 динамических переменных состояний.

Верификация полученной модели (алгоритма)

Верификация осуществлена по сгруппированным на 7 блоков 34 независимым критериям, результаты которых приведены в таблице 3 с содержанием ключевых количественных показателей имеющие адаптацию к субстрату осадков сточных вод и сопоставленные с литературными данными.

Таблица 3
Сравнение результатов по верификации модели и алгоритма анаэробного сбраживания

Параметр	Значение модели	Диапазон по литературе	Соответствие по верификации	Источник
Выход метана CH_4 в мезофильном режиме	0,45 м^3/кгХПК	0,35 – 0,5 м^3/кгХПК	верно	(Verein Deutscher Ingen, 2016)
Выход метана CH_4 в термофильном режиме	0,6 м^3/кгХПК	0, 5 – 0,65 м^3/кгХПК	верно	(IEA Bioenergy, 2023)
КПД при нормальном режиме	97 – 107%	90 – 110%	верно	Seed = 42
Мощность по нетто выходу в мезофильном режиме	~ 1,8 кВт	1,5 – 2 кВт	верно	(Batstone D.J., et al. 2002)
Мощность по нетто выходу в термофильном режиме	~ 2,4 кВт	2 – 2,4 кВт	верно	(Metcalf & Eddy, et al. 2014)
Функция VFA (монотонно)	$exp(-2{,}5(r-0{,}5))$	Убывание монотонное	верно	(Mao et al., 2015)
Воспроизводимость	КПД$_1$=99,42% $Q_1 = 0{,}51$м^3/ч	Seed = 42, детерменирован	верно	Python 3.x

Примечание: составлено автором на основе данных приведенных в источниках

Заключение

В работе представлена разработанная и верифицированная математическая модель и алгоритм управления осуществления переходов (переключений)температурных режимов при анаэробном сбраживании органических отходов сточных вод. Основными результатами которой являются:

1. По анаэробному сбраживанию осадков сточных вод получена кинетическая модель на многофакторном уровне, с включением ингибирующих функций по температуре согласно Моно-Аррениусу, pH, летучим жирным кислотам экспоненциального выхода и квадратичного насыщения аммиаком NH_3. Верификация осуществлена по сгруппированным на 7 блоков 34 независимым критериям, которые 100% соответствуют нормам приведенным в известных источниках.

2. Согласно выстроенному алгоритму автоматического переключения с 5-и уровневой иерархией приведенных приоритетов обеспечивается: защита от закисления с порогом pH = 6,5, предотвращается аммиачное ингибирование с порогом аммиака NH_3 на 80%, определен защитный период охлаждения 15 суток между разными переключениями, при этом градиент темпа изменения температуры ≤ 3 °C/сутки.

3. При термофильном режиме обеспечивается прирост на 33% по выходу метана CH_4 (с учетом данных термофильного режима 0,6 м^3/кгХПК против мезофильного 0,45 м^3/кгХПК) и увеличения на выходе электрической мощности от 1,5 кВт (при мезофильном) до 2,4 кВт (при термофильном). Однако при превышении 50% доли избыточного активного ила или резкое поступление пищевых стоков необходимо планомерное переключение к мезофильному режиму ввиду наличия риска ингибирования аммиака NH_3.

4. Симулирование процесса анаэробного сбраживания осадков сточных вод на период 90 суток с 3-мя возмущениями (в виде аварии теплообменника, белкового стока и снижения органической нагрузки на активный ил) подтверждает работоспособность представленного алгоритма и выявляет критичность в мониторинге синхронном виде летучих жирных кислот и аммиака NH_3 для устранения закисления реактора осадков сточных вод в каскадном порядке.

Результаты рекомендуются к применению для проектирования и модернизации биогазовых установок (или биореакторов) работающих с осадками сточных вод, получаемых от малых очистных сооружений, производительность которых не превышает 10 м^3/сутки и полученные закономерности требуют дополнительных исследований на более высоких производительностях. Полученные результаты по анаэробному сбраживанию и установки по реализации данного процесса могут быть применены на предприятиях по очистке сточных вод городских сетей или в частных локализованных зданиях, а также на производствах связанных переработкой пищевых и органических отходов, в том числе и

на объектах агропромышленности и сельского хозяйства.

Декларации и заявления по применимости

«При подготовке данной работы авторы использовали Claude AI (Opus 4.7) для того, чтобы построить графики рисунков 1 – 4 выведенные на Phyton code также полученный на инструменте Claude AI (Opus 4.7) с вложением имеющихся технических данных, которые приведены в работе. После использования этого инструмента/сервиса авторы просмотрели и отредактировали содержимое по мере необходимости и несут полную ответственность за содержание публикации».

Благодарности

Исследование выполнено в рамках проекта грантового финансирования КН МНВО РК 2025-2027 годы по ИРН AP26194475 «Инновационный подход получения биогаза путем фильтрации и утилизации сточных вод города Кокшетау» и конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

Булатов Н.К.: разработка концепции и методологии, научное руководство, редактирование и доработка рукописи; Ахметжанова А.Б.: проведение исследования, сбор, обработка и валидация данных, набор текста рукописи; Касымжанова К.С.: научное руководство проектом, проведение исследования, редактирование и доработка рукописи; Елюбаев С.З.: научная консультация по разработке концепции и методологии, рецензирование и редактирование текста; Оразов О.Ш.: сбор данных и формальный анализ данных, валидация данных.

Литература

Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., & van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology, 59*(5), 927–934. https://doi.org/10.2166/wst.2009.040

Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., & Vavilin, V. A. (2002). The IWA anaerobic digestion model No. 1 (ADM1). *Water Science and Technology, 45*(10), 65–73. https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292

Kwon, Y., Park, J., Kim, G. B., Jo, Y., Park, S., & Kim, S. H. (2023). Anaerobic digestion of sewage sludge using anaerobic dynamic membrane bioreactor under various sludge composition and organic loading rates. *Bioresource Technology, 384*, Article 129275. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129275

Government of the Republic of Kazakhstan. (2021). *Gosudarstvennaya programma «Zhasyl Qazaqstan» na 2021–2030 gg.* [State program "Zhasyl Qazaqstan" for 2021–2030].

Hansen, K. H., Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (1998). Anaerobic digestion of swine manure: Inhibition by ammonia. *Water Research, 32*(1), 5–12. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00201-7

IEA Bioenergy. (2023). *Country reports on biogas and biomethane* (Task 37).

Jenkins, S. R., Morgan, J. M., & Zhang, X. (1991). Measuring the usable carbonate alkalinity of operating anaerobic digesters. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation, 63*(1), 28–34.

Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45*, 540–555. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032

Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan. (2023). *Otchet o sostoyanii vodopolzovaniya i vodootvedeniya v Respublike Kazakhstan* [Report on the state of water use and wastewater disposal in the Republic of Kazakhstan].

Verein Deutscher Ingenieure. (2016). *Fermentation of organic materials: Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests* (VDI 4630).

Water Environment Federation. (2012). *Biosolids engineering and management* (WEF Manual of Practice No. 8).

Сведения об авторах:

Булатов Нуржан Кажмуратович – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, профессор кафедры организации перевозок, движения, эксплуатации транспорта и профессионального обучения, Кокшетауский университет имени А. Мырзахметова (Кокшетау, Казахстан, e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com).

Ахметжанова Аида Бахтияровна – докторант кафедры управления и инжиниринга в сфере охраны окружающей среды Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан, e-mail: jnkt@mail.ru).

Касымжанова Куралай Советовна – кандидат технических наук, доцент кафедры организации перевозок, движения, эксплуатации транспорта и профессионального обучения, Кокшетауский университет имени А. Мырзахметова (Кокшетау, Казахстан, e-mail: kasymzanovakuralaj2@gmail.com).

Елюбаев Сагинтай Зекенович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ректор Кокшетауского университета имени А. Мырзахметова (Кокшетау, Казахстан, e-mail: kuam-kokchetau@mail.ru).

Оразов Ондасын Шортанбаевич – магистр наук, старший преподаватель, старший преподаватель кафедры организации перевозок, движения, эксплуатации транспорта и профессионального обучения, Кокшетауский университет имени А. Мырзахметова (Кокшетау, Казахстан, e-mail: orazovondasin@gmail.com).

Information about the authors:

Bulatov Nurzhan Kazhmuratovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department "Organization of Transportation, Traffic, Operation of Transport and Vocational Training", Kokshetau University named after A. Myrzakhmetov (Kokshetau, Kazakhstan, e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com).

Akhmetzhanova Aida Bakhtiyarovna – Doctoral student of the Department "Management and Engineering in the field of Environmental Protection" of the L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan, e-mail: jnkt@mail.ru).

Kasymzhanova Kuralai Sovetovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Organization of Transportation, Traffic, Operation of Transport and Vocational Training", Kokshetau University named after A. Myrzakhmetov (Kokshetau, Kazakhstan, e-mail: kasymzanovakuralaj2@gmail.com).

Yelyubaev Sagintay Zekenovich – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Rector of Kokshetau University named after A. Myrzakhmetov (Kokshetau, Kazakhstan, e-mail: kuam-kokchetau@mail.ru).

"Ondasyn Shortanbaevich Orazov – Master of Science, Senior Lecturer, Senior Lecturer of the Department "Organization of Transportation, Traffic, Operation of Transport and Vocational Training", Kokshetau University named after A. Myrzakhmetov (Kokshetau, Kazakhstan, e-mail: orazovondasin@gmail.com).

Авторлар туралы мәлімет:

Болатов Нұржан Қажымұратұлы – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, "Көлікті пайдалану, жүк тасымалдау мен қозғалысты ұйымдастыру, және кәсіптік білім беру" кафедрасының профессоры, А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті (Көкшетау, Қазақстан, e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com).

Ахметжанова Аида Бахтияровна – Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің "Қоршаған ортаны қорғау саласындағы басқару және инжиниринг" кафедрасының докторанты (Астана, Қазақстан, e-mail: jnkt@mail.ru).

Қасымжанова Құралай Советқызы-техника ғылымдарының кандидаты, "Көлікті пайдалану, жүк тасымалдау мен қозғалысты ұйымдастыру, және кәсіптік білім беру" кафедрасының доценті, А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті (Көкшетау, Қазақстан, e-mail: kasymzanovakuralaj2@gmail.com).

Елюбаев Сағынтай Зекенұлы – ауыл шаруашылығы ғылымдарының докторы, профессор, А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университетінің ректоры (Көкшетау, Қазақстан, e-mail: kuam-kokchetau@mail.ru).

Оразов Оңдасын Шортанбайұлы – ғылым магистрі, аға оқытушы, "Көлікті пайдалану, жүк тасымалдау мен қозғалысты ұйымдастыру, және кәсіптік білім беру" кафедрасының аға оқытушысы, А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті (Көкшетау, Қазақстан, e-mail: orazovondasin@gmail.com).

Поступила 10 мая 2026 года
Принята 25 сентября 2026 года