

УДК 519.863

Т. М. Боровская, к. т. н., доц.; П. В. Северилов**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА
БИОГАЗА**

Проанализированы конструкции биореакторов для переработки различных отходов, построена базовая математическая модель функционирования биореактора и системы регулирования. Рассмотрены задачи параллельного и последовательного объединения реакторов.

Ключевые слова: биореактор, биогаз, бактерии, регулирование, математическая модель, распределенная система, оптимальное управление, интеграция, агрегирование.

Постановка проблемы. Промышленное производство биогаза – немодная новация. Рядом с алколем и биодизелем оно существует больше тридцати лет. Но только сегодня это направление должно выйти на первый план. Такое производство имеет двойную необходимость и двойное значение:

– сегодня необходимо увеличение производства в аграрном секторе в 3 – 4 раза (продукты питания, корма, биотопливо), что при существующих технологиях ведет к значительному ухудшению экологии;

– полное и быстрое внедрение переработки отходов растениеводства и животноводства одновременно и радикально улучшит энергетический баланс страны и экологическое состояние территорий.

Тепло, газ, качественные удобрения являются только побочным, полезным эффектом установок для биотехнической переработки органических отходов, а главная составляющая ценности – сохранение экологической среды. Первыми реальными пользователями просто будут вынуждены быть предприятия по переработке сельхозпродукции. Причины: глобализация, стандарты, необходимость пускать на свои территории международные инспекции по контролю производства. Пока биогазовые системы не стали массовыми в связи с отсутствием эффективных, дешевых и надежных систем для широкого спектра объемов переработки.

Нерешенные части проблемы. Существующие установки биопереработки отходов являются дорогими, слишком чувствительными к составу отходов, сложными в эксплуатации. Это делает их неконкурентными относительно альтернативных источников энергоснабжения и химических удобрений.

Цели разработки – создание комплекса имитационных моделей биореакторных систем для интенсивного поиска эффективных модульных конструкций и методов управления процессами биопереработки.

Постановка задачи. Эффективный путь решения этой проблемы – совместимое согласованное проектирование технологий и конструкции установки для переработки отходов, создание компьютерных моделей для накопления опыта и статистики на виртуальной реальности. Биохимические и термодинамические процессы в реакторе существенно нелинейны, нестационарны, неопределенны. Биореактор сложнее ядерного. Использование "интеллектуальных" регуляторов без изучения биохимических процессов и процессов генетической эволюции микроорганизмов – наилучший путь к окончательной дискредитации биореакторов и интеллектуальных систем. Предлагается разработка с двухуровневым регулятором:

– первый уровень – это разработка биотехнической системы с саморегулированием;

– второй уровень – разработка регуляторов, которые будут сервисными для биотехнической системы. Аналогом может быть обычный аквариум, где большинство

процессов регулируются экосистемой аквариума, а регуляторы обеспечивают нужные температуру, насыщение кислородом и освещение. Проблемы биореакторов не являются новыми, существует достаточно источников с достаточно полным анализом процессов и конструкций биореакторов, например [2]. В последнее время растет количество электронных публикаций и патентов по биореакторам для переработки отходов. Анализ и систематизация литературы невозможны в рамках статьи.

На базе просмотренных источников отобраны эмпирические данные о характеристиках процессов анаэробного метанового брожения – процессов, на которых, собственно, строится биореактор.

Структура процесса анаэробного брожения. Центром анализа и проектирования биореакторов являются естественные процессы переработки отходов соответствующими видами и штаммами бактерий. Решающий фактор эффективности биореакторов – эффективность и адаптивность культур бактерий. Сегодня идут интенсивные поиски таких культур в природе и выполняются дорогостоящие разработки новых штаммов с нужными свойствами, методами "генетического программирования". На рис. 1 представлена упрощенная схема процессов анаэробного брожения.

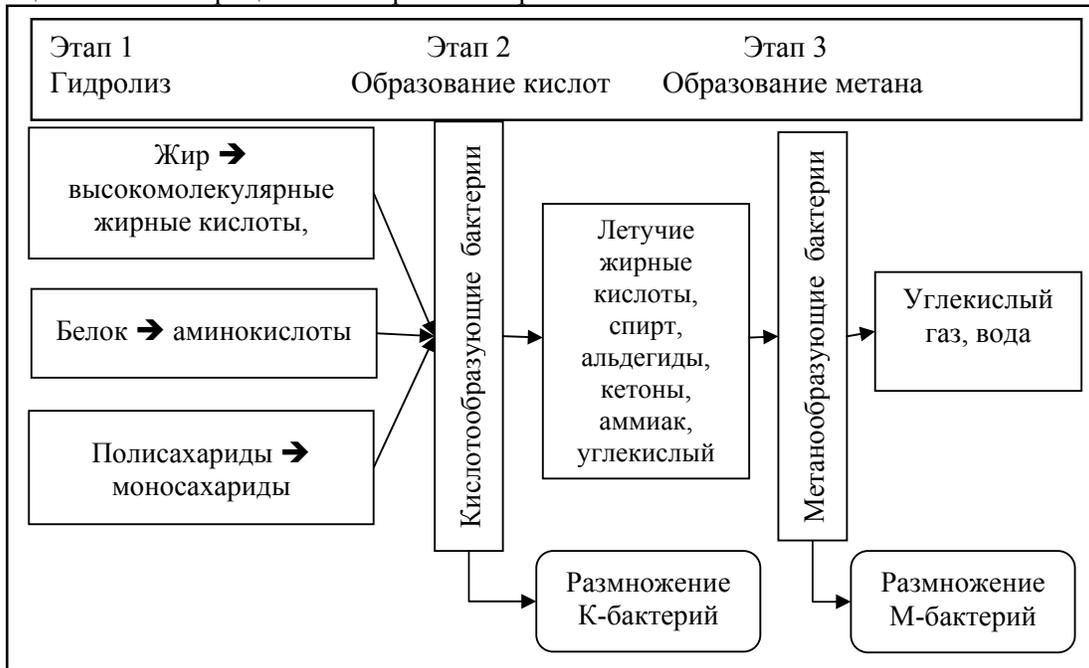


Рис. 1. Схема процесса анаэробного брожения

Главная особенность процессов брожения – наличие двух классов бактерий и соответственно – двух типов биохимических процессов. Эта особенность задает направление поиска эффективных структур биореактора, а именно, двухступенчатого с разделением процесса брожения. В этом случае возможно оптимизировать температуру и состав биомассы под конкретный тип бактерий.

Базовые конструкции биореакторов. На базе анализа десятков известных биогазовых установок отобраны две базовых модели биореакторов: малой мощности для малых хозяйств (рис. 2), и большой мощности для средних и больших предприятий (рис. 3).

Первый реактор (рис. 2) – дешевый, пластиковый, устойчивый к химически агрессивной среде, простой, пригодный для масштабирования и образования систем. Дополнительные преимущества – возможность переноса на другое место, возможность образования структур из базовых модулей.

Второй реактор (рис. 3) – большой единичной мощности, с максимальной энергоэффективностью и биопроизводительностью, однако, более дорогой, с большими

постоянными расходами на единицу измерения конечных продуктов [2]. Реактор имеет непрерывный цикл и противоточный теплообменник. Главное преимущество выбранной конструктивной схемы биореактора – непрерывность и стационарность процессов, возможность модификаций базовой схемы реактора, естественность механизмов регуляции.

Разработка системы управления биореактором. Структура и алгоритмы регулятора зависят от конструкции объекта управления, измеряемых параметров. Общее направление в системном проектировании регуляторов – проектирование объекта, который нуждается в минимальных расходах энергии и "интеллекта" для управления. Эффективный путь решения проблемы – совместимое согласованное проектирование технологий и конструкции установки для переработки отходов, создания компьютерных моделей для накопления опыта и статистики на виртуальной реальности. Биохимические и термодинамические процессы в реакторе существенно нелинейны, нестационарны, неопределенны.

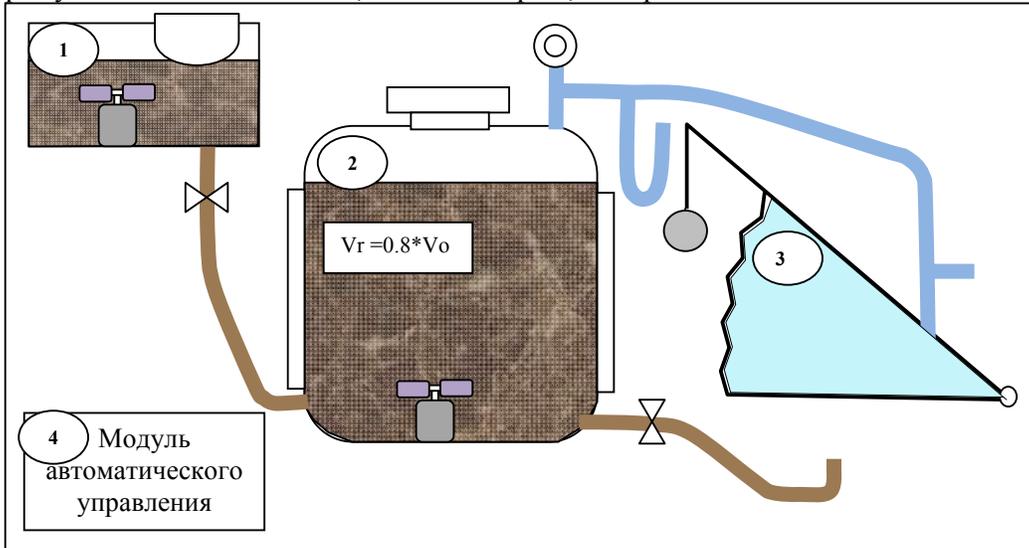


Рис. 2. Схема базовой биогазовой установки для домашнего хозяйства

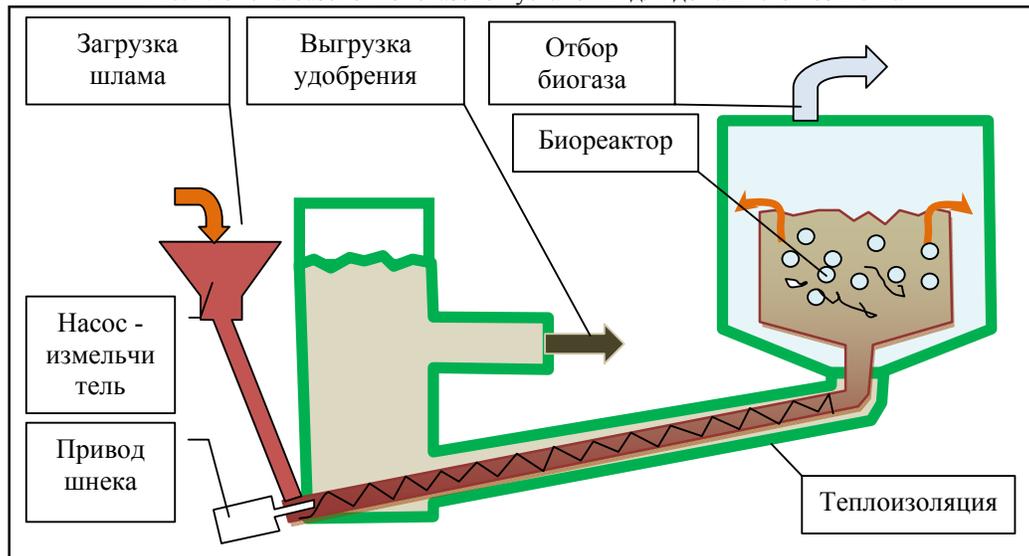


Рис. 3. Схема базовой установки для агробизнеса

Система моделирования реализована в двух доступных альтернативных средах – VisSim, Mathcad. На первом этапе исследований проанализированы варианты количества, расположения, типов измерителей и исполнительных элементов. Собрана библиотека моделей регуляторов температуры и подачи шлама: импульсных с амплитудной и фазовой

модуляцией, релейных, экстремальных. Выбрано проектное решение – разработать систему с прецизионной стабилизацией температуры и подачи отходов. Прототипами таких подсистем являются водонагреватели, кондиционеры, теплообменники. Идеальная система управления такая, которая не содержит электронику, механические и термические элементы управления. Примером такой системы является проект ядерного реактора, разработанного в Швеции (схема биореактора на рис. 3, тоже шведская модель). Автоматическая система аварийного отключения реактора не имеет ни одного выключателя, электродвигателя, транзистора. При остановке насосов охлаждения, падает давление и "тяжелая вода" с барьером вытесняет обычную воду и гасит реакцию. Аналогом может быть также обычный аквариум, где большинство процессов регулируются экосистемой аквариума, а регуляторы обеспечивают необходимые температуру, насыщение кислородом и освещение. Именно такие "натуральные" системы управления желательно разрабатывать для биореактора.

Выбрано решение – создать двухуровневый регулятор:

- первый уровень – биотехническая система с саморегулированием;
- второй уровень – сервисные регуляторы для биотехнической системы.

Разработка систем биореакторов. Первый этап в разработке системы биореакторов – тщательное изучение свойств поведения объекта управления (биохимических процессов) и выявления термодинамических и биохимических механизмов, которые порождают свойства. На этой основе формируется биотехническая система саморегулирования и сервисные системы. Параллельно с первыми образцами биореактора создается имитационная модель.

Второй этап – разработка систем биореакторов. На этом этапе используется информация об источниках ресурсов для переработки отходов, о потребностях и возможностях потенциальных клиентов. Определяются параметры базовой линейки (параметрического ряда) биореакторов и разрабатываются модели систем биореакторов с последовательным и параллельным соединением модулей. Эффективные математические модели позволяют значительную часть проектирования и испытаний провести в режиме компьютерной имитации.

На рис. 4 приведен пример линейки пластиковых реакторов. Базовая биогазовая установка состоит из пластмассового реактора, системы термостабилизации, устройства для перемешивания сырья, газгольдера. Функциональные и конструктивные модули установки:

1. Модуль подготовки и загрузки сырья с фильтрацией и перемешиванием;
2. Модуль "реактор с системой электроподогрева и перемешивания";
3. Модуль накопления и стабилизации давления газа;
4. Модуль автоматического управления.

Характеристики базовой линейки биогазовых установок

Объем реактора, м ³	3	5	8
Высота, мм	1600	2075	2200
Диаметр, мм	1630	1830	2230
Производство газа, м ³ /сутки	3 – 6	5 – 10	8 – 16
Производство удобрений, литров /добу	120	200	320

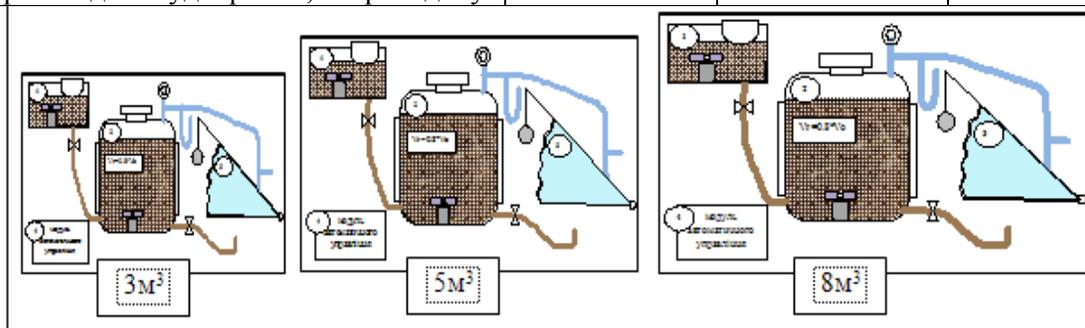


Рис. 4. Пример базовой линейки биогазовых установок

Последовательное соединение реакторов (рис. 5) позволяет разделить фазы брожения и в итоге повысить качество и экологическую безопасность удобрений. Модули загрузки, накопления газа и автоматики могут быть общими для всех последовательно включенных реакторов при незначительной модификации программных и технических средств.

Параллельное соединение реакторов (рис. 5) позволяет изменять пропускную способность системы в неограниченном диапазоне, повышает надежность и отказоустойчивость системы – при наличии трех и больше реакторов не вызывает проблем остановка одного из них для планового или аварийного ремонта. Параллельная структура позволяет специализировать каждый биореактор по виду ресурса (отходы птицефабрик, свиноферм и др.).

Образование систем биореакторов порождает комплекс задач оптимального распределения обобщенных ресурсов между элементами последовательных и параллельных сочетаний элементов. Теоретические основы для получения оптимальных решений таких задач созданы Р. Беллманом – это задача распределения, задача сглаживания [1]. В работах [3, 4] даны постановки и решения задач оптимального распределения ресурсов пригодные для реализации в регуляторах.

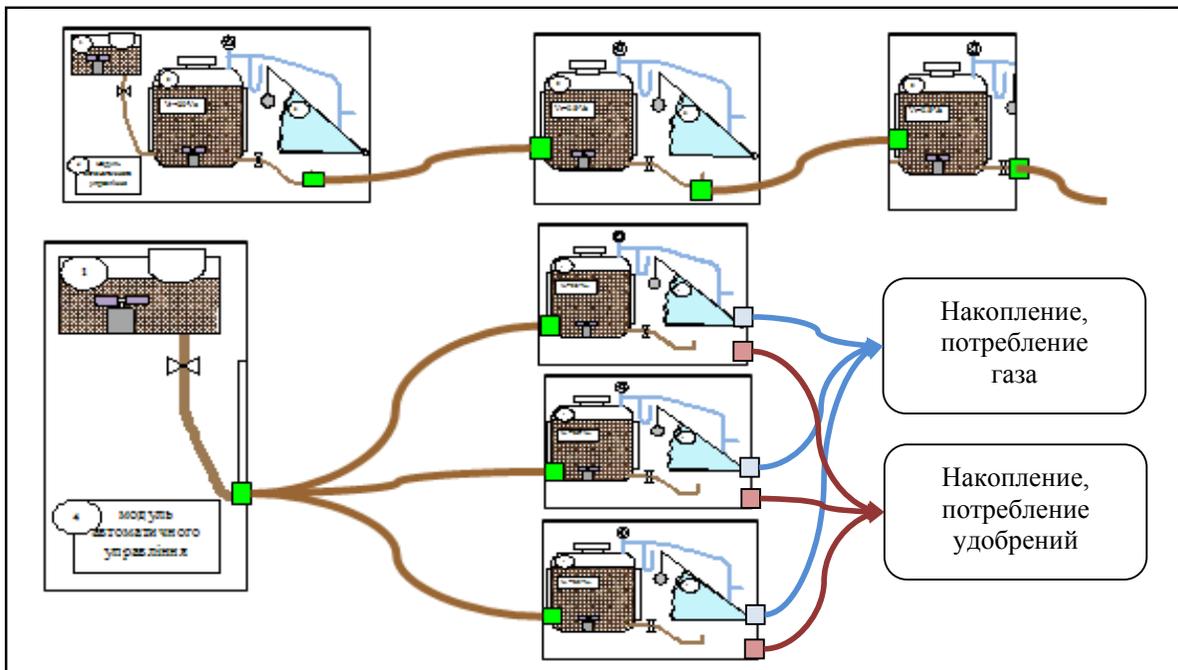


Рис. 5. Примеры последовательного и параллельного соединений биореакторов

Эмпирические характеристики биореактора как преобразователя ресурсов. Сырьем для биореактора могут быть: животные отходы, птичий помет, разнотравье, отходы мясной промышленности, силос. При многолетней эксплуатации биореакторов собраны статистические данные относительно их характеристик как технологических преобразователей. Следует, однако, учитывать влияние современных технологий в растениеводстве и животноводстве на эффективность переработки отходов, так как инъекции антибиотиков могут сделать непригодными для переработки отходы птицефабрики. Поэтому приведенные в таблице 1, 2 усредненные данные могут иметь существенный разброс.

Таблица 1

Необходимый объем реактора в зависимости от количества животных и птиц

Объем реактора, м ³	Количество животных и птиц		
	КРС, голов	Свиньи, голов	Куры, 100 голов
3	10	40	16
10	40	150	24
25	100	400	160
50	200	800	320
100	400	1600	640
150	600	2300	960
200	800	3000	1280

Таблица 2

Характеристики органического удобрения

Исходное сырье	N общ. %	N аммоний %	P фосфор %	K калий %	Влажность %	pH
Птичий помет	0,2 – 0,8	0,1 – 0,5	0,87 – 1,7	0,4 – 0,8	80 – 90	8
Свиной навоз	0,2 – 1,2		0,1 – 0,4		80 – 90	6,3 – 8,1
Навоз КРС	0,4	0,25	0,2	0,45	80 – 90	

Затрата таких удобрений в среднем составляет 500 литров на гектар на весь период вегетации. Следует отметить, что формальное сравнение органического удобрения с комплексными минеральными удобрениями не является корректным. Органическое удобрение, кроме азота, фосфора, калия, имеет в своем составе незаменимые микроэлементы, сложные активные соединения. Поэтому сравнение эффективности удобрений следует проводить в одинаковых условиях (на соседних полях), как прирост урожая на единицу стоимости, а не вес удобрений. Однако приращение урожая тоже не полностью характеризует эффект органического удобрения. С учетом экологических потерь, современное, высокопродуктивное агропроизводство является существенно убыточным. Поэтому главная составляющая эффекта биореакторов не биогаз, удобрения, а именно минимизация экологических потерь и угроз.

Математические модели биореактора как преобразователя ресурсов. Анализ свойств процессов и статистических данных позволяет построить систему базовых рабочих моделей. Модели реализованы в средах доступных пакетов – VisSim и Mathcad.

Зависимость выхода газа от температуры процесса. Задаем диапазон температур шлама $teg := 0..60$, диапазон времени процессов $tvr := 0,2..150$. Формируем модель зависимости полного количества газа от температуры. Вводим идентифицированные значения параметров моделей: $a11 := 0.001$; $a12 := 0.0012$; критические температуры брожения в шламе $tb1 := 33 gradC$; $tb2 := 53 gradC$; $Sm := 2.5$; $Amh := 1.95$; масштаб для графика $mg := 0.4$. Записываем текст программного модуля.

$$V_{gtot}(te) := \begin{cases} V_{gt1} \leftarrow 1.0 - a11 \cdot (te - tb1)^2 \\ V_{gt2} \leftarrow 1.2 - a12 \cdot (te - tb2)^2 \\ v_{yx} \leftarrow V_{gt1} \cdot (te < 40) + V_{gt2} \cdot (te \geq 40) \end{cases} \quad (1)$$

На рис. 6 представлены зависимости объема газа и требуемой длительности процесса от температуры шлама.

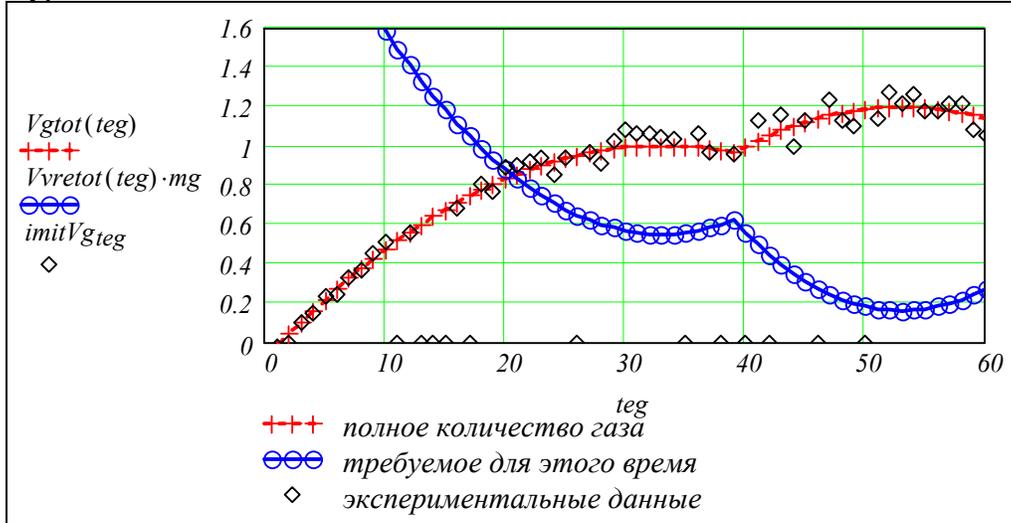


Рис. 6. Зависимости объема и длительности выдачи газа от температуры

Модуль параметрической идентификации характеристики «температура – выход газа» может включаться в состав экстремального регулятора температуры.

Модель динамики анаэробного брожения. Модель динамики процесса брожения относится к классу нелинейных обобщенных моделей "роста с ограничением". В процессах брожения принимают участие два класса бактерий, поэтому следует динамику описывать как сумму процессов с переменными соотношениями этих процессов. Записываем базовое дифференциальное уравнение процесса роста с ограничением:

$$\frac{d}{dt} x = k1 \cdot x - k2 \cdot x^{a1}, \quad (2)$$

где $k1, k2, a1$ – параметры модели.

Регуляторы системы управления импульсные, поэтому получим эквивалентную разностную математическую модель. Заменяем производную разностью первого порядка:

$$\frac{d}{dt} x[(n+1) \cdot T] = \frac{x[(n+1) \cdot T] - x[n \cdot T]}{T}, \quad (3)$$

где n – номер шага квантования, T – шаг квантования.

Для представления функций дискретного аргумента $t = n \cdot T$ используем индексированные переменные t_n, x_n . Зададим параметры моделирования: количество шагов $N := 400$, шаг $T := 0.02$; индексная переменная $n := 1..N$; начальный индекс массивов $ORIGIN := 1$; дискретное время $t_n = n \cdot T$. Зададим значение параметров $k1$ и $k2$ процесса: $k1=6; k2=6$. Зададим начальное значение x : $x_1 := 0.0$ и запишем разностное уравнение процесса, построим график:

$$x_{n+1} := x_n + \left[k1 \cdot x_n - k2 \cdot (x_n)^{a1} \right] \cdot T. \quad (4)$$

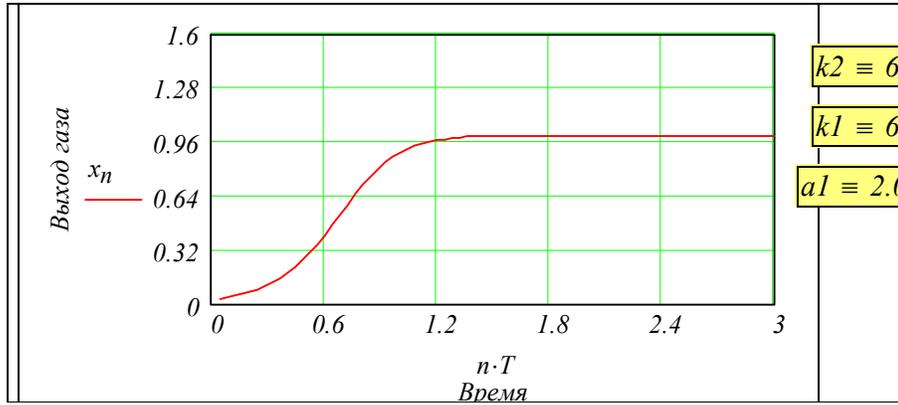


Рис. 7. Процесс брожения при малом начальном количестве бактерий

Построим модель процесса как функцию пользователя:

$$\bar{x}(k1, k2, a1) := \begin{cases} x_1 \leftarrow 0.03 \\ \text{for } n \in 1..N \\ x_{n+1} \leftarrow x_n + \left[k1 \cdot x_n - k2 \cdot (x_n)^{a1} \right] \cdot T \\ x \end{cases} \quad (5)$$

Имеем два типа микроорганизмов и два процесса брожения с разными параметрами. Построим соответствующую модель. Зададим тестовые параметры модели:

кислотный процесс $k11:=2.1; k12:=.3; a11:=1.8;$
 метановый процесс $k21:=5; k22:=5; a21:=1.9; \alpha:=0.9.$

Запишем выражение для смешанного процесса брожения на базе модуля (5):

$$Xs := \alpha \cdot x(k11, k12, a11) + (1 - \alpha) \cdot x(k21, k22, a21). \quad (6)$$

Сформируем зависимости процесса брожения от температуры на основе идентифицированных параметров для процессов при 20, 30, 50 градусах Цельсия. Формируем соответствующие модели:

$$\begin{aligned} Xs20 &:= \alpha \cdot x(k11, k12, a11) + (1 - \alpha) \cdot x(k21, k22, a21); \\ Xs30 &:= \alpha \cdot x(k11 \cdot 1.45, k12 \cdot 1.3, a11) + (1 - \alpha) \cdot x(k21, k22, a21); \\ Xs50 &:= \alpha \cdot x(k11 \cdot 1.66, k12 \cdot 1.45, a11) + (1 - \alpha) \cdot x(k21, k22, a21). \end{aligned}$$

Часть метана в исходном газе составляет 65 – 75%. Берем среднее значение $kpdm := 0.7$ и формируем функции выхода метана:

$$Xs20m := kpdm \cdot Xs20; \quad Xs30m := kpdm \cdot Xs30; \quad Xs50m := kpdm \cdot Xs50.$$

Построим графики процессов с учетом разбросов, которые могут быть большими (рис. 8)

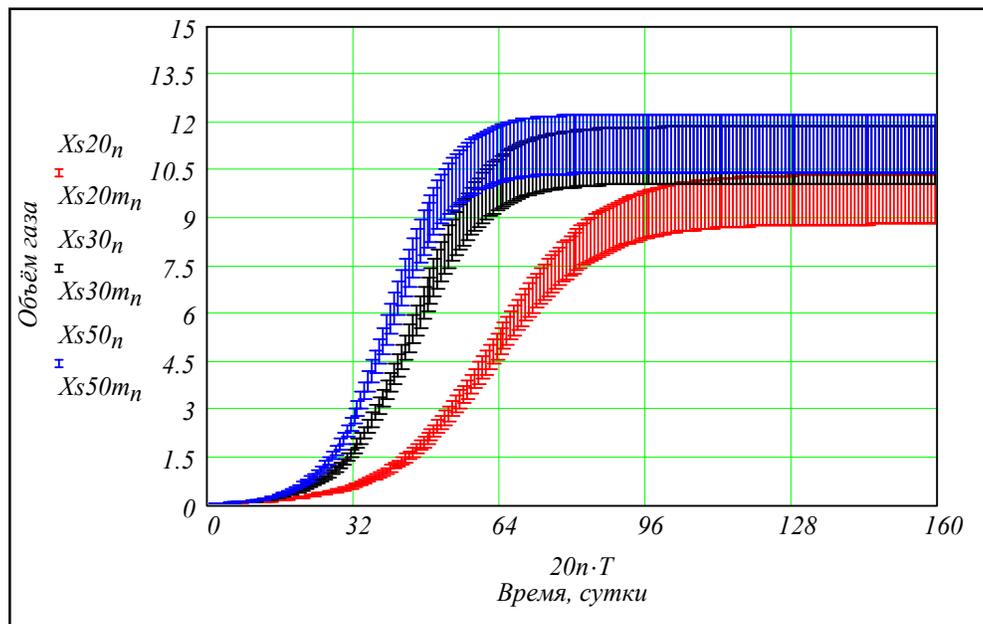


Рис. 8. Процессы образования газа при температурах 20, 30, 50С°

Задачи управления системами биореакторов. При создании систем биореакторов из определенных модулей возникают задачи верхнего уровня:

- задачи оптимизации технологического процесса брожения в системе с последовательно соединенными реакторами, что можно также назвать задачами специализации модулей по фазам процесса;
- задачи специализации параллельно соединенных реакторов по видам сырья (отходы птицеводства, животноводства и др.);
- задачи стратегического управления развитием системы биореакторов в составе определенного агропредприятия.

Базовые решения оптимизационных задач оптимального распределения обобщенных ресурсов для задач 1 и 3 получены в [3], а для задачи 2 – в работе [4].

Выводы. Выбрана система базовых конструкций биореакторов, разработана система математических моделей, ориентированных на исследование и построение ультранадёжной адаптивной системы управления. Разработанные имитационные модели функционирования биореакторов позволяют оценивать локальные и глобальные преимущества, ценности их внедрения. Представленный материал также позволяет понять причину неэффективного внедрения биореакторов – междисциплинарность, которая делает эту проблему по сути "свободной".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беллман Р. Некоторые вопросы математической теории управления / Р. Беллман, И. Гликсберг, О. Гросс. – М.: Издат. иностр. литер., 1962. – 233 с.
2. Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз: Теория и практика. (Пер. с нем.) – М. Колос, 1982. – 148 с.
3. Северілов П. В., Гула К. І. Моделі оптимального розподілу ресурсів у вертикально інтегрованій системі. Вісник ВПІ. – 2009. – № 1. – С. 6
4. Боровська Т. М. Оптимізація розподілу обмеженого ресурсу у виробничій системі на базі агрегування виробничих функцій / Боровська Т. М., Колесник І. С., Северілов В. А. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2005. – № 1. – С. 12–18.

Боровская Таиса Николаевна – к. т. н., доцент кафедры компьютерных систем управления;

Северілов Павел Викторович – соискатель кафедры компьютерных систем управления. Винницкий национальный технический университет.