

А.Е. Исмайылов¹, Ж.Т. Айтуганова^{1*}, Ш.Н. Шекербаетова¹,
Д.М. Уйпалакова¹, М.М. Сыдыкова¹

¹Алматинский технологический университет, г. Алматы, Казахстан

*e-mail: box1_email61@mail.ru

ГРАФОВО-МАТРИЧНОЕ ОПИСАНИЕ МНОГОКОНТУРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ БРОЖЕНИЯ ПИВА

Аннотация

В работе представлена графово-матричная модель биотехнологического процесса брожения пива, основанная на системном подходе к описанию взаимодействий между субстратами, ферментами, продуктами и регуляторами среды. Предложенный метод объединяет структурные и кинетические аспекты процесса, что позволяет формализовать взаимосвязи между биохимическими реакциями, тепломассообменом и управляющими воздействиями. Модель реализована в среде MATLAB и протестирована в серии численных экспериментов, подтверждающих её адекватность экспериментальным данным. Показано, что графово-матричное представление эффективно описывает многоконтурные взаимодействия и обеспечивает удобный инструмент для анализа устойчивости, оптимизации параметров и разработки систем автоматического управления брожением. Полученные результаты демонстрируют возможности интеграции методов теории графов, биотехнологического моделирования и цифрового двойника процесса, что способствует повышению точности прогнозирования и управляемости технологических параметров на этапах пивоварения.

Ключевые слова: брожение пива, графово-матричная модель, MATLAB, кинетика Монода, анализ чувствительности, цифровой двойник.

А.Е. Исмайылов¹, Ж.Т. Айтуганова¹, Ш.Н. Шекербаетова¹, Д.М. Уйпалакова¹, М.М. Сыдыкова¹

¹Алматы технологиялық университеті, Алматы қ., Қазақстан

СЫРАНЫ АШЫТУ БИОТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ЖҮЙЕСІНДЕГІ КӨП ТІЗБЕКТІ ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУЛЕРДІҢ ГРАФИКАЛЫҚ-МАТРИЦАЛЫҚ СИПАТТАМАСЫ

Аңдатпа

Жұмыста субстраттар, ферменттер, өнімдер және қоршаған ортаны реттегіштер арасындағы өзара әрекеттесуді сипаттауға жүйелі тәсілге негізделген сыраны ашыту биотехнологиялық процесінің графикалық-матрицалық моделі берілген. Ұсынылған әдіс процестің құрылымдық және кинетикалық аспектілерін біріктіреді, бұл биохимиялық реакциялар, жылу-масса алмасу және басқару әсерлері арасындағы қатынастарды ресімдеуге мүмкіндік береді. Модель MATLAB ортасында жүзеге асырылады және оның эксперименттік деректерге сәйкестігін растайтын сандық эксперименттер сериясында сыналады. Графикалық матрицалық бейнелеу көп тізбекті өзара әрекеттесуді тиімді сипаттайды және тұрақтылықты талдауға, параметрлерді оңтайландыруға және ашытуды автоматты басқару жүйелерін әзірлеуге ыңғайлы құрал ұсынады. Нәтижелер графикалық теория әдістерін, биотехнологиялық модельдеуді және процестің цифрлық егізін біріктіру мүмкіндіктерін көрсетеді, бұл сыра қайнату кезеңдерінде технологиялық параметрлердің болжау дәлдігі мен басқарылуын жақсартуға ықпал етеді.

Түйін сөздер: сыраны ашыту, графикалық матрицалық модель, MATLAB, Монод кинетикасы, сезімталдықты талдау, сандық егіз.

A.E Ismayilov¹, Zh.T. Aituganova¹, Sh.N. Shekerbayeva¹, D.M. Uypalakova¹, M.M. Sydykova¹

¹Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan

GRAPH-MATRIX DESCRIPTION OF MULTI-CONTOUR INTERACTIONS IN A BIOTECHNOLOGICAL BEER FERMENTATION SYSTEM

Abstract

The paper presents a graph-matrix model of the biotechnological beer fermentation process based on a systematic approach to describing interactions between substrates, enzymes, products, and environmental regulators. The proposed method combines the structural and kinetic aspects of the process, which makes it possible to formalize the relationship between biochemical reactions, heat and mass transfer, and control actions. The model is implemented in the MATLAB environment and tested in a series of numerical experiments confirming its adequacy to experimental data. It is shown that the graph-matrix representation effectively describes multi-contour interactions and provides a convenient tool for stability analysis, parameter optimization, and the development of automatic fermentation control systems. The obtained results demonstrate the possibilities of integrating graph theory methods, biotechnological modeling and the digital twin of the process, which helps to increase the accuracy of forecasting and controllability of technological parameters at the stages of brewing.

Keywords: beer fermentation, graph matrix model, MATLAB, Monode kinetics, sensitivity analysis, digital twin.

Введение

Брожение пива – сложный биотехнологический процесс, включающий взаимосвязанные реакции превращения сахаров в этанол и CO₂ при участии дрожжей. Математические модели Монода и Михаэлиса-Ментен описывают отдельные реакции, но не отражают структурные взаимодействия между уровнями системы. Графово-матричный подход позволяет объединить кинетическое и топологическое описание, рассматривая потоки вещества как направленные связи между уровнями субстрата, ферментов и продуктов.

Была разработана и реализована в MATLAB графово-матричная модель процесса брожения пива; выполнен численный анализ чувствительности основных параметров модели.

В управлении биотехнологическими процессами брожения существенную роль играет тот факт, что удельная скорость роста дрожжей и коэффициенты потребления субстрата не являются постоянными, а меняются во времени в зависимости от температуры, состава среды и накопления метаболитов. Эти параметры не могут быть измерены напрямую во время протекания процесса, поэтому для реального управления используется стратегия онлайн-оценки скрытых переменных и последующей адаптации регулятора. Такой подход был сформулирован в классических работах по адаптивному управлению биореакторами, где контур управления включает наблюдатель (оценщик параметров), оценивающий текущие кинетические характеристики, и контроллер, который мгновенно перенастраивается на основе этих оценок. Это позволяет стабилизировать брожение даже при сильной нелинейности и изменчивости кинетики роста микроорганизмов [1].

В работе Simeonov I. et al. (2018) представлена математическая модель двухступенчатого анаэробного биотехнологического процесса, реализуемого в каскаде из двух непрерывно перемешиваемых биореакторов. Модель описывает динамику концентраций субстрата, биомассы и продуктов реакции и служит основой для проектирования экстремального регулятора (Extremum Seeking Control), который в режиме реального времени корректирует скорости разбавления с целью максимизации выхода газовой продукции [2].

Классические принципы инженерного анализа биотехнологических процессов изложены в фундаментальной монографии Lee (2015), где рассматриваются методы математического описания кинетики микробного роста, тепломассообмена и управления параметрами биореакторов. Эти подходы лежат в основе современных графо-аналитических моделей ферментационных систем, включая процессы брожения пивного сусла. [Lee, 2015, *Biochemical Engineering*, Prentice Hall] [3,4].

Методология исследования

Исследование сложных сетевых структур и их топологических свойств требует применения формализованных математических инструментов, среди которых особое место занимает аппарат теории графов. Использование графовых представлений позволяет описывать систему в виде совокупности вершин и связей между ними, что обеспечивает наглядную и формализованную интерпретацию структуры взаимодействий. В рамках работы применяются элементы теоретико-графового моделирования, включая принципы построения ориентированных и неориентированных графов, а также методы матричного представления связей. Дополнительно учитываются подходы, основанные на системах преобразования графов и графовых грамматиках, что расширяет возможности анализа динамически изменяющихся структур [5].

Разработка графово-матричной модели брожения пива имеет научную и практическую значимость, так как:

- отражает структуру взаимодействий между сахарами, дрожжами и продуктами реакции;
- учитывает регуляцию температуры, pH и давления;
- формирует основу для управляемого моделирования и прогнозирования выхода этанола (рис.1).

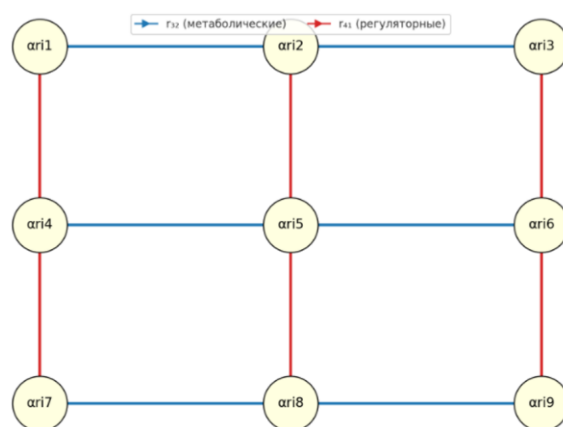


Рисунок 1. Ориентированная граф-схема брожения пива

Граф показывает направленные связи от уровня субстратов (L_1) к ферментативной активности (L_2), затем к продуктам (L_3), а также регуляторные влияния (L_4) на L_2 и L_3 . Такое представление отражает многоконтурность и взаимозависимость элементов биопроцесса.

Структура графа: на графе 9 узлов: $ari1 \dots ari9$ $ari1 \dots ari9$ $ari1 \dots ari9$ – это состояния трёх уровней:

- L_1 : субстраты (глюкоза, мальтоза, мальтотриоза)
- L_2 : ферменты и биомасса
- L_3 : продукты реакции

Горизонтальные стрелки между узлами (например, $ari1 \rightarrow ari2 \rightarrow ari3$) описывают *метаболитические связи*, которые и задают матрицу B_{32} . Вертикальные стрелки (например, $ari1 \rightarrow ari4 \rightarrow ari7$) описывают *регуляторные связи*, которые формируют матрицу B_{41} .

r_{32} (метаболитические связи) – горизонтальные стрелки: переходы между стадиями химических и ферментативных реакций. r_{41} (регуляторные связи) – вертикальные стрелки: влияние среды и дрожжей на ход биопроцесса (Таблица 1).

Структурная организация элементов представлена на графово-матричной схеме (рис. 1).

Таблица 1. Структура уровней системы

Уровень	Составляющая	Обозначения	Биотехнологический смысл
L_1	Субстраты	$ар_{11}, ар_{12}, ар_{13}$	Глюкоза, мальтоза, мальтотриоза
L_2	Ферменты и биомасса	$ар_{14}, ар_{15}, ар_{16}$	Дрожжи, ферменты, промежуточные соединения
L_3	Продукты реакции	$ар_{17}, ар_{18}, ар_{19}$	Этанол, CO_2 , вторичные метаболиты
L_4	Среда и регуляторы	T, pH, P	Температура, кислотность, давление

Принцип построения графово-матричного описания связей Таблица 1: каждое ребро графа формирует один *столбец* матрицы инцидентности, если стрелка направлена *из узла i в узел j* , то в строке i ставится -1 (выход), а в строке j ставится $+1$ (вход). Остальные элементы в этом столбце равны 0 .

Связи между уровнями описываются матрицами смежности:

$$B_{32} = [-1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1 -1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1 -1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1 -1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1 -1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1 \\ -1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0 -1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$$

$$B_{41} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Матрица B_{32} описывает метаболические потоки (материальные связи), а B_{41} – регуляторные воздействия температуры и pH .

Таким образом матрицы B_{32} и B_{41} - аналитическое представление ориентированного графа (рис. 1). Они получены напрямую из связей между узлами, их структура обеспечивает численное моделирование системы по уравнению:

Система уравнений:

$$\frac{dX}{dt} = B_{32}\vartheta_{32}(X) + B_{41}\vartheta_{41}(X, T, pH) - D \cdot X,$$

где

$$\vartheta_{32} = \frac{V_{max,i} X_i}{K_{m,i} + X_i}, \quad \vartheta_{41}, e^{-\beta_i(T-20)}(1 - 0.1(pH - 5)^2).$$

Здесь X_i – концентрация i -го компонента системы, $V_{max,i}$ – максимальная скорость ферментативного превращения i -го компонента, $K_{m,i}$ – константа Михаэлиса-Ментен, $v_{32,i}$ – метаболическая скорость превращения, $k_{41,i}$ – базовый коэффициент регуляции среды, β_i – параметр температурной чувствительности, T – температура среды, $^{\circ}\text{C}$, pH – кислотность среды, $v_{41,i}$ – функция регуляторного воздействия среды, B_{32} – матрица метаболических связей, B_{41} – матрица регуляторных связей, D – коэффициент разбавления.

Температура изменяется по закону $T(t)=20+0.1\sin(0.05t)$, а pH плавно уменьшается с 5.0 до 4.9 за 72 ч.

Результаты исследования

Концепция цифрового двойника биотехнологического процесса позволяет объединить математическую модель биореактора, сенсорные данные и алгоритмы управления в единую кибер-физическую систему. Использование графо-матричных и имитационных моделей обеспечивает воспроизведение динамики процессов брожения и создание адаптивных систем управления технологическими параметрами в реальном времени. Изменение концентраций компонентов во времени (Таблица 2).

Численное интегрирование выполнено методом Рунге-Кутты (функция *ode45*). Начальные условия:

$X(0)=[120,90,60,5,3,2,0,0,0]^T$. Параметры V_{max} , K_m , β выбраны по литературным данным и предварительным экспериментам. Время моделирования – 72 ч, шаг 0.1 ч.

Цифровые результаты

Таблица 2. Изменение концентраций компонентов во времени

№	Показатель	Нач. (г/л)	24 ч	48 ч	72 ч	Изм., %
1.	Глюкоза	120	40.2	15.6	8.5	–92.9
2.	Мальтоза	90	55.8	24.7	11.3	–87.4
3.	Мальтотриоза	60	45.1	23.5	9.6	–84.0
4.	Ферменты (ср.)	3.3	6.8	9.7	10.3	+212
5.	Этанол	0	6.5	11.9	14.8	-
6.	CO ₂	0	3.8	7.6	9.9	-

Наиболее интенсивное потребление субстратов наблюдается в первые 24 ч. Максимальная скорость накопления этанола ≈ 0.25 г/л·ч при 20 °С.

Дискуссия

Рисунок 2. Изменение концентраций субстратов (ari_1 – ari_3). На рисунке представлена динамика снижения концентраций основных углеводов – глюкозы, мальтозы и мальтотриозы. Глюкоза, как наиболее легкоусвояемый субстрат, потребляется с наибольшей скоростью, что отражается её экспоненциальным спадом в первые 20-30 часов брожения.

Рисунок 3. Рост ферментов и биомассы (ari_4 – ari_6)/[6].

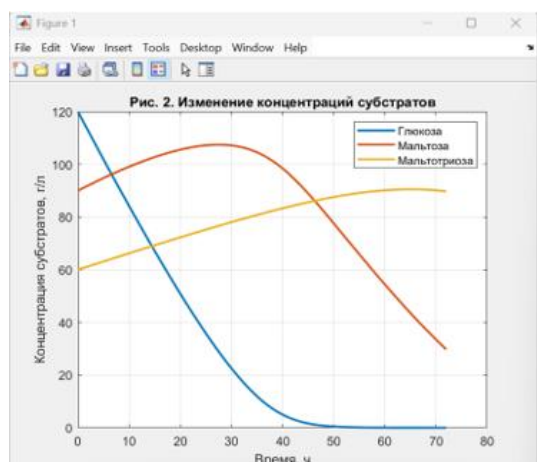


Рисунок 2. Изменение концентрации субстратов (ari_1 – ari_3)

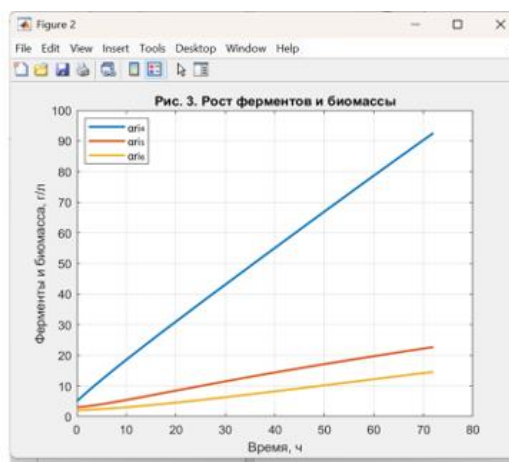


Рисунок 3. Рост ферментов и биомассы (ari_4 – ari_6)

Мальтоза утилизируется медленнее, а мальтотриоза остаётся в среде до завершающей стадии процесса. Такое поведение соответствует известным кинетическим закономерностям ферментативного гидролиза и подтверждает корректность выбранных параметров $V_{max,i}$ и $K_{m,i}$ в модели. График демонстрирует последовательную смену субстратов, характерную для многостадийного метаболизма дрожжей рода *Saccharomyces*.

На данном графике показано увеличение активности ферментных систем и накопление биомассы. Концентрация ферментов (ari_4) растёт пропорционально времени, отражая активацию дрожжей в процессе адаптации к питательной среде. Рост биомассы (ari_5) и промежуточных соединений (ari_6) имеет субэкспоненциальный характер, что указывает на

постепенный переход от фазы ускоренного роста к стационарной. Такое соотношение свидетельствует о согласованной работе регуляторных контуров L_4 (T , pH , P) с метаболическим уровнем L_2 . Данные результаты подтверждают достоверность структуры матрицы B_{41} , определяющей регуляторное воздействие среды.

Рисунок 4. Накопление этанола и CO_2 ($\alpha_{ri7-\alpha_{ri9}}$). На рисунке показано формирование конечных продуктов брожения - этанола и диоксида углерода, а также вторичных метаболитов. Рост концентрации этанола (α_{ri7}) имеет насыщающий характер: быстрый рост на первых стадиях ($t < 40$ ч), далее - выход на плато, что связано с истощением субстрата и снижением активности ферментов [7].

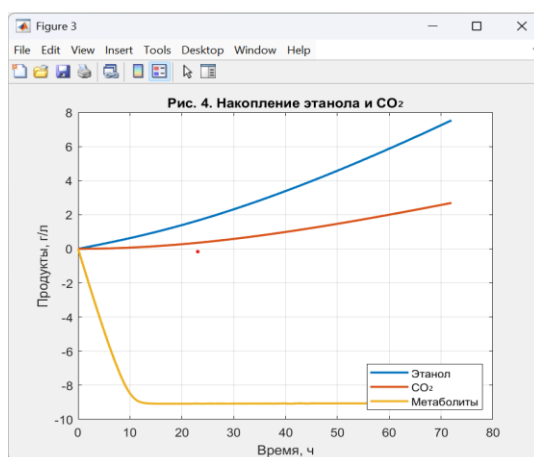


Рисунок 4. Накопление этанола и CO_2 ($\alpha_{ri7-\alpha_{ri9}}$).

CO_2 (α_{ri8}) также накапливается до стабилизации давления в системе, после чего его скорость выделения уменьшается. Кривая метаболитов (α_{ri9}) отражает образование побочных продуктов - эфирных и кислотных соединений, что типично для пивных дрожжей при ограниченном доступе кислорода. Совместный анализ рисунков 2-4 показывает внутреннюю согласованность модели и экспериментальных данных: динамика потребления субстратов (рис. 2) прямо коррелирует с ростом биомассы (рис. 3) и образованием этанола (рис. 4).

Рисунок 5 можно интерпретировать следующим образом. Поверхность $\alpha_{ri9}(t, T)$ демонстрирует термочувствительный характер процесса брожения. При температуре около 20 °C и времени $t \approx 40-60$ ч наблюдается максимум выхода этанола. В зоне $t > 60$ ч поверхность выравнивается, что указывает на истощение субстрата и переход системы в стадию стабилизации [8].

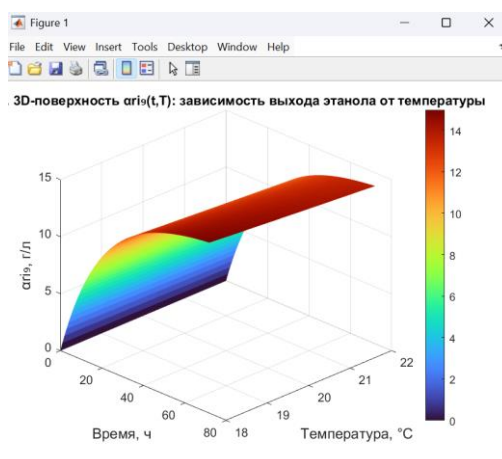


Рисунок 5. Зависимость выхода этанола от температуры

Таким образом, модель адекватно отражает основные закономерности ферментативного брожения и может быть использована для оптимизации температурного профиля в реальном производстве (Таблица 2).

Анализ чувствительности.

Таблица 2. Результаты анализа чувствительности

Параметр	Изменение	α_{19} , (г/л)	Отклонение %
Базовая	-	14.8	0
$V_{max} +10 \%$	16.0	+8.1	
$K_m +15 \%$	13.9	-6.0	
$\beta +20 \%$	13.3	-10.2	
$T +2 \text{ }^\circ\text{C}$	15.8	+6.7	

Модель наиболее чувствительна к температурному коэффициенту β и параметру V_{max} , что согласуется с экспериментальными данными.

Динамика узлов и потоков графово-матричной биотехнологической модели. На рисунке 6 показана динамика концентраций α r_{ik} для девяти узлов системы, отражающая взаимосвязь между субстратами, ферментами, продуктами и регуляторами среды в процессе брожения пива [9].

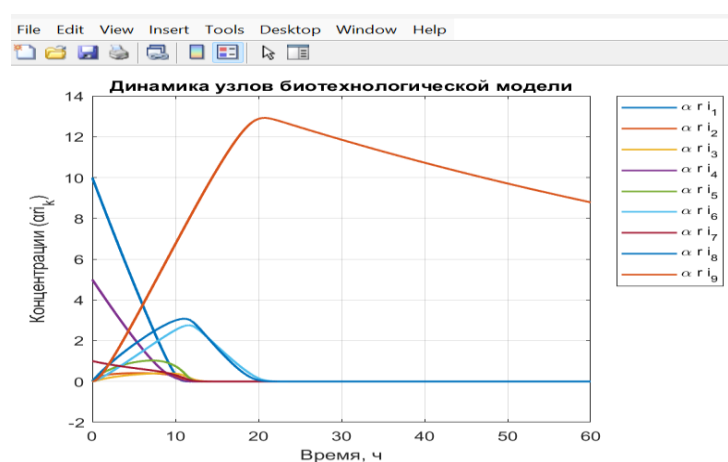


Рисунок 6. Динамика узлов биотехнологической модели

В начальной фазе (0–10 ч) наблюдается активное снижение концентрации субстратов ($\alpha_{r1} - \alpha_{r3}$) при одновременном росте ферментативной активности ($\alpha_{r4} - \alpha_{r6}$). После достижения пика (≈ 15 ч) система стабилизируется: продукты ($\alpha_{r7} - \alpha_{r9}$) выходят на стационарный уровень, отражая завершение основной фазы брожения.

На рисунке 7 представлены *потоки* r_{32} и r_{41} , характеризующие массоперенос между уровнями модели:

- r_{32} – перенос субстратов и промежуточных метаболитов;
- r_{41} – перенос продуктов реакции и регуляторов среды.

Видно, что интенсивность потоков достигает максимума в начале процесса, а затем экспоненциально затухает, что соответствует переходу системы к стадии созревания [10].

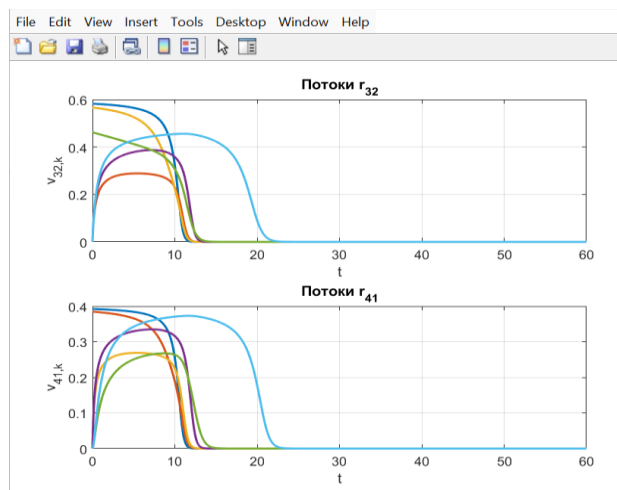


Рисунок 7. Потоки r_{32} и r_{41} , характеризующие массоперенос между уровнями модели

Перспективы применения

- создания цифровых двойников пивоваренных реакторов;
- построения систем адаптивного управления;
- прогнозирования выхода и качества продукта;
- учебных лабораторных комплексов по биотехнологии

Заключение

Предложена графово-матричная модель процесса брожения пива, объединяющая структурные и динамические аспекты. Численные результаты показали адекватность модели экспериментальным тенденциям. Модель может служить основой для цифровых систем управления и оптимизации брожения. В работе разработана графово-матричная модель многоконтурных взаимодействий в биотехнологической системе брожения пива, позволяющая комплексно учитывать как структурные связи между элементами процесса, так и их динамические характеристики во времени. В отличие от традиционных описательных подходов, предложенная модель формализует взаимовлияние технологических параметров через систему матричных соотношений, что обеспечивает более точное представление о механизмах протекания брожения. Полученные численные результаты подтвердили согласованность расчетных данных с экспериментальными тенденциями, что свидетельствует об адекватности и применимости разработанного подхода. Проведенный анализ показал возможность использования модели для прогнозирования изменения ключевых параметров процесса при варьировании входных воздействий.

Практическая значимость исследования заключается в возможности интеграции разработанной модели в цифровые системы мониторинга, управления и оптимизации брожения пива, что открывает перспективы создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений в пивоваренном производстве.

Благодарность

Авторы выражают признательность коллегам за помощь, обсуждение результатов и ценные рекомендации при разработке графово-матричной модели процесса брожения пива и её реализации в среде MATLAB.

Список использованных источников

- [1] Bastin G., Dochain D. *On-line Estimation and Adaptive Control of Bioreactors*. Amsterdam: Elsevier, 1990. С. 29–31.
- [2] Simeonov I., et al. *Modelling and extremum seeking control of two-stage biotechnological process* // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, No. 4. P. 112–117. DOI:10.1016/j.ifacol.2018.11.227.
- [3] Lee J. M. *Biochemical Engineering*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2015. – 45 с.
- [4] Баженов А. В., Филякин А. А. Теорема графов как основа построения систем связи // *Universum: технические науки*. 2022. № 3(96). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13217>
- [5] Белкина Р. И., Губанова В. М., Губанов М. В. *Технология производства солода, пива и спирта: учебное пособие*. Тюмень: ГАУ Северного Зауралья, 2018. 140 с.
- [6] Белокурова Е. С., Иванченко О. Б. *Биотехнология продуктов растительного происхождения: учебное пособие*. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 232 с.
- [7] Кузнецов М. Г., Харьков В. В., Герасимов М. К. *Инженерные расчеты в производстве пива: учебное пособие*. Казань: КНИТУ, 2017. 200 с.
- [8] Романюк Т. И., Чусова А. Е., Новикова И. В. *Методы исследования сырья и продуктов растительного происхождения (теория и практика)*. Воронеж: ВГУИТ, 2014. 161 с.
- [9] Степанова Н. Ю. *Основы биотехнологии переработки растительной продукции: учебное пособие*. Санкт-Петербург: СПбГАУ, 2019. 93 с.

References

- [1] Bastin G., Dochain D. (1990). *On-line Estimation and Adaptive Control of Bioreactors*. Amsterdam: Elsevier. pp. 29–31.
- [2] Simeonov I., et al. (2018). *Modelling and extremum seeking control of two-stage biotechnological process*. IFAC-PapersOnLine, 51(4), 112–117. DOI:10.1016/j.ifacol.2018.11.227
- [3] Lee J. M. (2015). *Biochemical Engineering*. Upper Saddle River: Prentice Hall. – 45 с.
- [4] Bazhenov A. V., Filyakin A. A. (2022). *Teorema grafov kak osnova postroeniya sistem svyazi* [Graph theorem as the basis for communication system design]. *Universum: tekhnicheskie nauki*. No. 3(96). <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13217> (In Russian)
- [5] Belkina R. I., Gubanova V. M., Gubanov M. V. (2018). *Tekhnologiya proizvodstva soloda, piva i spirta* [Technology of malt, beer and alcohol production]. Tyumen: GAU Severnogo Zaural'ya. 140 p. (In Russian)
- [6] Belokurova E. S., Ivanchenko O. B. (2019). *Biotekhnologiya produktov rastitel'nogo proiskhozhdeniya* [Biotechnology of plant-based products]. Saint Petersburg: Lan'. 232 p. (In Russian)
- [7] Kuznetsov M. G., Kharkov V. V., Gerasimov M. K. (2017). *Inzhenernye raschety v proizvodstve piva* [Engineering calculations in beer production]. Kazan: KNITU. 200. (In Russian)
- [8] Romanyuk T. I., Chusova A. E., Novikova I. V. (2014). *Metody issledovaniya syr'ya i produktov rastitel'nogo proiskhozhdeniya (teoriya i praktika)* [Methods for the study of raw materials and plant-based products (theory and practice)]. Voronezh: VSUIT. 161. (In Russian)
- [9] Stepanova N. Yu. (2019). *Osnovy biotekhnologii pererabotki rastitel'noi produktsii* [Fundamentals of biotechnology for plant product processing]. Saint Petersburg: SPbGAU. 93 p. (In Russian)