

Сведения об авторах

Дана Каримтаевна Сатыбалдина – ассоциированный профессор, кандидат технических наук, и.о. профессора кафедры «Системный анализ и управление», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: satybaldina_dk@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5445-4516>.

Нурбол Бейбитович Шмитов* – докторант, специальность «Автоматизация и управление» кафедры «Системный анализ и управление», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: nurbol-970817@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6402-9633>.

Нурдаулет Муратбекулы Тешебаев – докторант, специальность «Интеллектуальные системы управления» кафедры Искусственного интеллекта и Big Data, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Республика Казахстан; e-mail: nurdauletteshebaev@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6560-6578>.

Айна Жанузаквна Закарина – PhD, старший преподаватель кафедры «Системный анализ и управление»; Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: zakarina_azh@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3875-2883>.

Корлан Сагындыковна Кульниязова – старший преподаватель кафедры «Системный анализ и управление»; Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: kulniyazova_ks@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8320-2091>.

Information about the authors

Dana Karimtaevna Satybaldina – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Acting Professor of the Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: satybaldina_dk@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5445-4516>.

Nurbol Beibitovich Shmitov* – PhD student in Automation and Control, Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurbol-970817@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6402-9633>.

Nurdaulet Muratbekuli Teshebayev – PhD student in Intelligent Control Systems, Department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurdauletteshebaev@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6560-6578>.

Aina Zhanuzakovna Zakarina – PhD, Senior Lecturer of the Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: zakarina_azh@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3875-2883>.

Korlan Sagyndykovna Kulniyazova – Senior Lecturer of the Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kulniyazova_ks@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8320-2091>.

Редакцияға енуі 30.03.2026

Өңдеуден кейін түсуі 23.04.2026

Жариялауға қабылданды 27.04.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-5](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-5)



MPHTI: 50.43.15

Р.С. Бекбаева, М.Д. Сарбаева*, К.С. Бекбаев, Г.Б. Абдилова, Н.А. Айманбетов

Шәкәрім университеті,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинка көшесі, 20А

*e-mail: sarbayeva0104@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ САХАРОВ ИЗ ПШЕНИЧНОЙ СОЛОМЫ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КИСЛОТНОГО И ФЕРМЕНТАТИВНОГО ГИДРОЛИЗА

Аннотация: Представлена разработка и экспериментальная верификация автоматизированной системы управления двухстадийным гидролизом пшеничной соломы, реализованной на основе интеграции динамической кинетической модели в контур модельно-предиктивного управления. Объект управления характеризуется нелинейной динамикой, наличием

©Р.С. Бекбаева, М.Д. Сарбаева, К.С. Бекбаев, Г.Б. Абдилова, Н.А. Айманбетов, 2026

технологических ограничений и чувствительностью к вариациям состава сырья, включая содержание целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, что обосновывает применение предиктивных методов управления. В структуре АСУ реализована иерархическая архитектура: локальные PID-регуляторы обеспечивают стабилизацию температурного и pH-режимов, тогда как модельно-предиктивное управление осуществляет оптимизацию управляющих воздействий по критерию максимизации выхода сахаров с учетом ограничений по температуре, давлению и времени обработки. Математическая модель включает кинетику кислотного гидролиза (гемицеллюлоза–ксилоза-фурфурол) и ферментативной стадии на основе модифицированного уравнения Михаэлиса-Ментен с учетом ингибирования и инактивации ферментов. Управление реализовано на дискретной модели состояния с шагом 1 мин и учетом переходных процессов. Система реализована на базе программируемого логического контроллера с интеграцией SCADA для сбора и визуализации данных. Экспериментальная апробация показала повышение выхода сахаров до 76-85 %, снижение коэффициента вариации до 4 %, уменьшение концентрации ингибиторов, сокращение времени стабилизации и энергозатрат, а также устойчивость к возмущениям и изменениям состава сырья

Ключевые слова: автоматизированная система управления, модельно-предиктивное управление, математическое моделирование, гидролиз, пшеничная солома, лигноцеллюлозное сырьё, извлечение сахаров.

Введение

Пшеничная солома является одним из наиболее доступных видов агропромышленных отходов в зернопроизводящих регионах. Мировое производство пшеницы превышает 780 млн т в год, при этом соотношение соломы к зерну составляет 1:1-1,3, что формирует значительные объёмы лигноцеллюлозного сырья, большая часть которого не используется, несмотря на высокий потенциал как источника моносахаридов [1].

Спрос на растворимые сахара растёт в связи с развитием биотоплива и биопродуктов; наблюдается дефицит сахара (до 2,95-5,4 млн т), что усиливает интерес к альтернативным источникам углеводов [2].

Традиционные методы гидролиза имеют ограничения: кислотный сопровождается образованием ингибиторов, подавляющих последующую ферментацию, а ферментативный требует длительного времени и высоких доз ферментов [3]. Отсутствие предобработки снижает затраты, но усложняет кинетику и управление процессом [4].

Математическое моделирование включает кинетические модели кислотного гидролиза [5] и модели ферментативной стадии на основе уравнения Михаэлиса-Ментен [6], которые обычно применяются при фиксированных условиях и редко используются в системах управления реального времени.

Автоматизация гидролиза ограничена применением PID- и нечетких регуляторов. MPC показало свою эффективность для ферментативного гидролиза [7], однако существующие решения ориентированы на предварительно обработанное сырьё и не учитывают жёсткие ограничения процесса.

Таким образом, отсутствуют комплексные решения для интеграции кинетических моделей в системы управления двухстадийным гидролизом пшеничной соломы без предварительной обработки в реальном времени.

Цель исследования – разработать и экспериментально верифицировать автоматизированную систему управления процессом извлечения редуцирующих сахаров из пшеничной соломы на основе математической модели двухстадийного гидролиза.

Для достижения цели решались задачи: получение экспериментальных данных, построение кинетической модели, разработка АСУ на основе MPC и экспериментальная проверка её эффективности.

Научная новизна заключается в разработке и верификации кинетической модели двухстадийного гидролиза пшеничной соломы без предобработки и её интеграции в систему MPC в реальном времени.

Условия и методы исследования

Пшеничная солома была получена из Восточно-Казахстанского региона (Семей). Сырьё сушили до влажности 8-10 % и измельчали до фракции 1-5 мм. Состав определяли стандартными методами: содержание целлюлозы 38-42% (по методу Кюршнера-Ханак), гемицеллюлозы 24-28%, лигнина 16-20% (по Класону), золы 4-6 %, влажности 9-11%.

Кислотный гидролиз проводили в лабораторном автоклаве (5 л) при 121°C и 1,1 атм. Загружали 200 г соломы и раствор H_2SO_4 (0,5-2%) при гидромодуле 1:10. Время выдержки составляло 30-120 мин. После реакции суспензию охлаждали, фильтровали, промывали, нейтрализовали до pH 5,5-6,0 и удаляли осадок. Анализ гидролизатов выполняли по содержанию редуцирующих сахаров (DNS-метод с калибровкой по глюкозе) и моносахаридов (ВЭЖХ). Ингибиторы определяли методом ВЭЖХ с УФ-детектором.

Ферментативный гидролиз проводили в биореакторе (1 л) с лопастной мешалкой (200 об/мин) при 45-50 °C и pH 4,8-5,0. Загружали 50-100 г сухого остатка, цитратный буфер (0,05 М), ферментный комплекс (Cellic CTec2 или аналог, 15-40 FPU/г целлюлозы + β -глюкозидаза 20-50 CBU/г). Продолжительность процесса составляла 48-96 ч. Пробы анализировали аналогично кислотной стадии [8].

Биореактор (1 л) оснащён датчиками температуры, pH и концентрации сахаров. Перемешивание, дозирование реагентов и терморегулирование обеспечивались стандартным лабораторным оборудованием.

Кинетическое моделирование выполняли отдельно. Кислотную стадию описывали моделью Саемана (гемицеллюлоза $\rightarrow$ ксилоза $\rightarrow$ фурфурол); параметры определяли методом наименьших квадратов (Python, SciPy), $R^2 = 0,92-0,96$. Система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d[H]}{dt} = -k_1[H], \\ \frac{d[X]}{dt} = k_1[H] - k_2[X], \\ \frac{d[F]}{dt} = k_2[X]. \end{cases} \quad (1)$$

где $[H]$ – концентрация гемицеллюлозы, г·л⁻¹; $[X]$ – концентрация ксилозы, г·л⁻¹; $[F]$ – концентрация фурфурола, г·л⁻¹; k_1, k_2 – константы скоростей реакций мин⁻¹, зависящие от температуры и кислотности среды.

Модель ферментативной стадии основывали на уравнении Михаэлиса-Ментен с учётом ингибирования продуктами и инактивации фермента:

$$V = \frac{V_{max}[S]}{K_m \left(1 + \frac{[P]}{K_i}\right) + [S]} \cdot e^{-k_d t} \quad (2)$$

где $[S]$ – концентрация субстрата (целлюлозы), г·л⁻¹; $[P]$ – концентрация продуктов реакции, г·л⁻¹; V_{max} – максимальная скорость гидролиза, г·л⁻¹·мин⁻¹; K_m – Михаэлиса, г·л⁻¹; K_i – константа ингибирования, г·л⁻¹; k_d – константа инактивации, мин⁻¹.

Параметры определяли нелинейной регрессией (Python, SciPy). Коэффициент детерминации для ферментативной стадии R^2 достигал 0,89-0,94 [9].

АСУ реализована на базе ПЛК Siemens S7-1200 с интеграцией SCADA. Система обеспечивает сбор данных и управление процессом. Данные от датчиков передавались в SCADA-систему для мониторинга и управления процессом.

Управление реализовано в два уровня: PID-регуляторы для стабилизации температуры и pH и модельно-предиктивное управление (MPC). MPC основан на дискретной модели состояния (шаг 1 мин) с ограничениями по температуре и давлению. Параметры контроллера определяли по экспериментальным данным переходных процессов системы.

На рисунке 1 представлена система двухстадийного гидролиза с MPC-управлением. Эксперименты планировали по центральному композиционному дизайну с обработкой данных методом ANOVA ($p \leq 0,05$). Все эксперименты выполняли в трёх повторностях.

Результаты исследований

В ходе моделирования и экспериментальной верификации идентифицированы параметры кинетических моделей кислотной и ферментативной стадий (табл. 1). На рисунках 2-3 показаны результаты моделирования кислотной и ферментативной стадий.



Рисунок 1 – Блок-схема АСУ процесса извлечения сахаров.

Таблица 1 – Параметры кинетических моделей кислотной и ферментативной стадий

Параметры	Единица	Кислотная стадия	Ферментативная стадия
k_1	мин ⁻¹	0,042 (±0,005)	–
k_2	мин ⁻¹	0,008 (±0,001)	–
V_{max}	г·л ⁻¹ ·ч ⁻¹	–	8,7 (±0,9)
K_m	г·л ⁻¹	–	4,8 (±0,6)
K_{iG}	г·л ⁻¹	–	18,5 (±2,2)
k_d	ч ⁻¹	–	0,0012 (±0,0003)
K_{ads}	л·г ⁻¹	–	0,15 (±0,03)

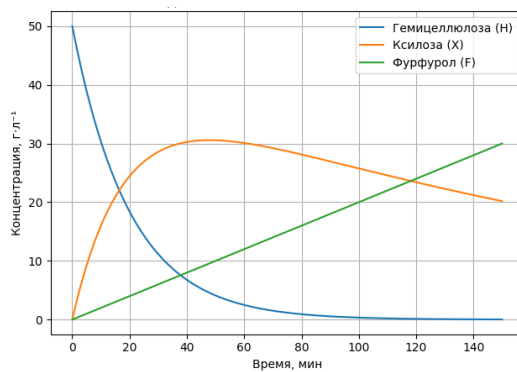


Рисунок 2 – Симулированные кривые по модели Саемана для кислотной стадии гидролиза (0,8 % H₂SO₄, 121 °C).

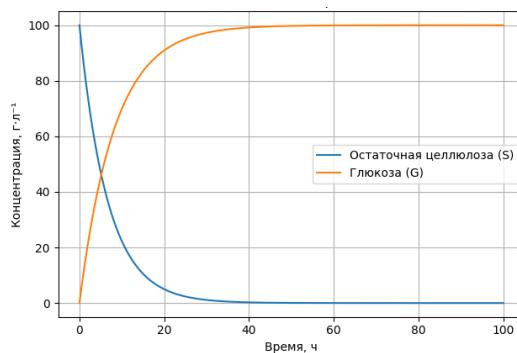


Рисунок 3 – Динамика субстрата и глюкозы на ферментативной стадии по модифицированной модели Михаэлиса-Ментен (20 FPU/г целлюлозы, 45-50 °C, pH 4,8-5,0).

Модель позволяет прогнозировать выход сахаров с точностью $\pm 8\%$ при вариации концентрации кислоты и дозы фермента в пределах экспериментального диапазона.

Переходные процессы кислотной стадии показаны на рисунке 4.

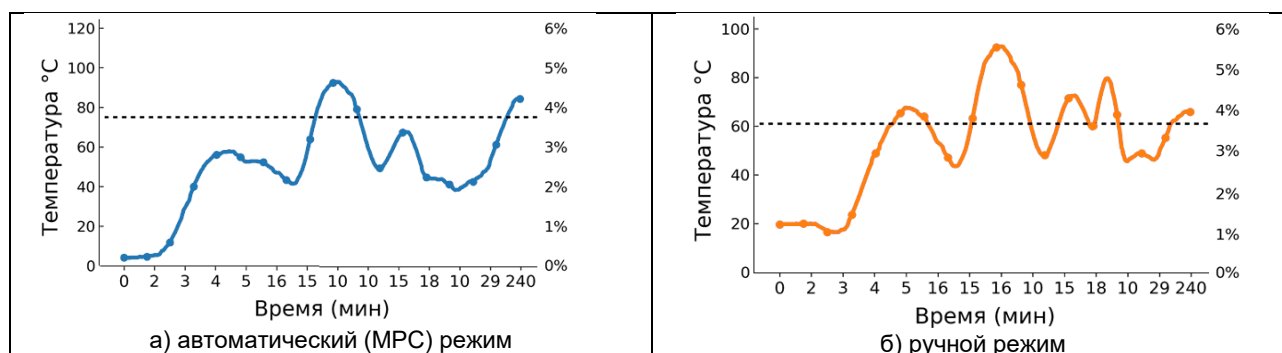


Рисунок 4 – Переходные процессы температуры и выхода ксилозы (кислотная стадия, 0,8 % H_2SO_4)

В автоматическом режиме температура стабилизируется за 9-11 мин с перерегулированием $<1^\circ C$, пик ксилозы достигается через 52-58 мин, что соответствует расчётным значениям (0,8 % H_2SO_4). В ручном режиме отклонения снижают выход сахаров на 12-18 % и увеличивают концентрацию фурфурола на 25-40% (табл. 2).

Таблица 2 – Сравнение режимов управления

Параметры	Ручной режим	Автоматический режим (МРС)	Разница, %
Время стабилизации температуры, мин	14-22 ($\pm 4,1$)	9-11 ($\pm 1,2$)	-36...-50
Перерегулирование температуры, $^\circ C$	2,8-5,1 ($\pm 1,3$)	0,4-1,1 ($\pm 0,3$)	-78...-86
Выход редуцирующих сахаров (общий), %	52-68 ($\pm 7,4$)	66-85 ($\pm 3,2$)	+14...+25
Коэффициент вариации выхода, %	10,8-12,6 ($\pm 1,1$)	3,9-4,7 ($\pm 0,4$)	-62...-68
Концентрация фурфурола, г·л ⁻¹	1,4-2,3 ($\pm 0,5$)	0,9-1,4 ($\pm 0,2$)	-35...-39

Обсуждение научных результатов

Разработанная кинетическая модель использована как основа системы управления гидролизом в реальном времени, обеспечивающей оптимальные условия, снижение образования ингибиторов и повышение воспроизводимости выхода сахаров.

Экспериментальная проверка выполнена в лабораторных условиях. Сравнивали ручной режим (121 $^\circ C$, 60 мин, 0,8 % H_2SO_4 , 20 FPU/г) и МРС (табл. 3); каждая серия включала 12 циклов и 6 при вариации содержания целлюлозы $\pm 4\%$.

Таблица 3 – Сравнение эффективности режимов управления

Показатели	Ручной режим	Автоматический режим (МРС)	Улучшение, %
Выход редуцирующих сахаров (общий), %	58,4 ($\pm 6,8$)	76,2 ($\pm 3,1$)	+30,5
Выход ксилозы (кислотная стадия), %	62,1 ($\pm 7,2$)	74,8 ($\pm 2,9$)	+20,5
Выход глюкозы (ферментативная стадия), %	55,3 ($\pm 6,5$)	77,6 ($\pm 3,4$)	+40,3
Концентрация фурфурола, г·л ⁻¹	1,9 ($\pm 0,4$)	1,2 ($\pm 0,2$)	-36,8
Коэффициент вариации выхода, %	11,7 ($\pm 1,4$)	4,1 ($\pm 0,5$)	-65,0
Общая продолжительность цикла, ч	96-112 ($\pm 8,2$)	74-86 ($\pm 4,7$)	-23,1
Энергозатраты на нагрев, кВт·ч/кг сырья	1,48 ($\pm 0,21$)	1,12 ($\pm 0,14$)	-24,3

Применение МРС увеличивает выход сахаров с 58,4 % до 76,2 %, снижает образование фурфурола с 1,9 до 1,2 г·л⁻¹ и уменьшает коэффициент вариации более чем в 2,5 раза. Повышение выхода наблюдается на обеих стадиях (ксилоза: 62,1 $\rightarrow$ 74,8 %, глюкоза: 55,3 $\rightarrow$ 77,6 %) при одновременном сокращении длительности процесса и энергозатрат. В МРС-режиме наблюдается более интенсивное накопление сахаров и стабильное плато без выраженной передегградации (рис. 5).

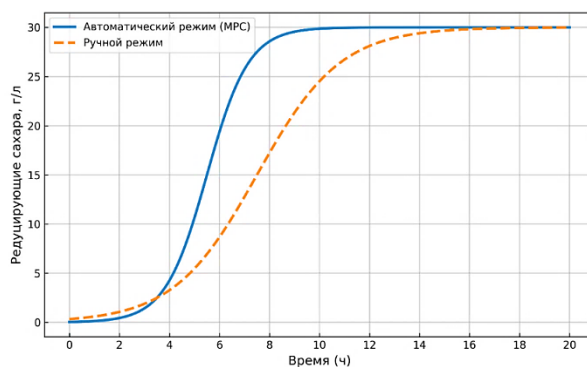


Рисунок 5 – Кривые накопления редуцирующих сахаров в автоматическом и ручном режимах

Анализ чувствительности показал устойчивость системы к вариациям состава сырья: при изменении содержания целлюлозы от 38 до 42 % отклонение выхода сахаров в MPC-режиме не превышало $\pm 4,2$ %, тогда как в ручном достигало $\pm 11,8$ %. Адаптивная идентификация параметров обеспечивала сохранение точности прогноза.

Кинетическая модель кислотной стадии адекватно описывает данные при концентрации H_2SO_4 0,5-2,0 % и времени 30-120 мин ($R^2 = 0,91-0,93$); для фурфурола наблюдается занижение при длительных временах, связанное с упрощением модели [9].

Модель ферментативной стадии на основе уравнения Михаэлиса-Ментен воспроизводит накопление глюкозы с $R^2 = 0,89-0,94$; отклонение 6-11 % и возрастает при увеличении дозы фермента из-за недоучёта его адсорбции на лигнине.

Применение MPC обеспечивает более быстрое достижение заданной температуры ($9,7 \pm 1,0$ мин против $17,4 \pm 3,7$ мин) с меньшим перерегулированием, снижая деградацию ксилозы и образование ингибиторов. Сравнение показывает, что при разбавленном кислотном гидролизе выход ксилозы составляет 60-75 % [2] при концентрации фурфурола $1,5-3,0 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ [3]; получено 74,8 % и $1,2 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ соответственно. Для ферментативной стадии выход глюкозы (77,6 %) соответствует литературным данным (70-85%) без предобработки [10]. MPC-подходы обеспечивают повышение конверсии на 15-30%, что согласуется с полученным увеличением до 40,3 %; при этом используется необработанное сырьё.

Система эффективна в лабораторных условиях, однако масштабирование требует учёта тепло- и массообмена. Предложенный подход может быть применён для других видов агроотходов и интеграции онлайн-анализаторов сахаров. Полученные результаты подтверждают преимущество модельно-предиктивного управления над традиционными методами при гидролизе лигноцеллюлозы.

Заключение

Интеграция кинетической модели в систему модельно-предиктивного управления (MPC) обеспечивает повышение выхода сахаров на 25-40%, снижение образования ингибиторов на 30-40% и уменьшение вариабельности более чем в 2,5 раза по сравнению с ручным управлением. Энергозатраты на нагрев сокращаются на 20-25%, а продолжительность цикла – на 23%. Система воспроизводима и может быть адаптирована для полупромышленного масштаба при заданных ограничениях по температуре и давлению.

Разработанная модель двухстадийного гидролиза пшеничной соломы адекватно описывает кинетику процессов (121°C , 1,1 атм; $45-50^\circ\text{C}$) с высокой точностью ($R^2 = 0,89-0,96$), обеспечивая прогноз выхода сахаров с погрешностью не более ± 8 %.

Подход обеспечивает стабильное извлечение сахаров без предварительной обработки сырья и может быть использован для масштабирования и переработки других видов лигноцеллюлозных отходов. При масштабировании разработанного подхода от лабораторного автоклава объемом 5 л к промышленным реакторам необходимо учитывать ограничения, связанные с изменением условий тепло- и массообмена, увеличением времени выхода на режим и возможной неоднородностью распределения концентраций, что потребует дополнительной настройки параметров предиктивной модели.

Список литературы

1. Lignocellulosic biomass to bioethanol: a comprehensive review with a focus on pretreatment / S.H. Mood et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 27. – P. 77-93.
2. The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials / S. Sun et al // Bioresource Technology. – 2016. – Vol. 199. – P. 49-58.
3. Acid hydrolysis of wheat straw: A kinetic study / E. Guerra-Rodríguez et al // Biomass and Bioenergy. – 2012. – Vol. 36. – P. 346-355.
4. A review on delignification of lignocellulosic biomass for enhancement of ethanol production potential / R. Singh et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 32. – P. 713-728.
5. Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass / H. Ostby et al // Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology. – 2020. – Vol. 47. P. 623-657.
6. Areeya S. Model predictive control of enzymatic hydrolysis reactor / S. Areeya, M. Sriariyanun // Springer. Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 251, E3. – P. 257-266.
7. Development of novel bioreactor control systems based on smart sensors and actuators / B. Wang et al // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2020. – Vol. 8. – Article 7.
8. Евстафьев С.Н. Активация полисахаридов соломы пшеницы для ферментативного гидролиза методом высокотемпературного этанолиза / С.Н. Евстафьев, Е.С. Фомина // Биотехнология. – 2024. – Vol. 40, № 2. – С. 62-67.
9. Чемерис О.В. Ферментативный гидролиз соломы пшеницы и ячменя препаратом целлюлаз гриба *Ipex lacteus* / О.В. Чемерис // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2025. – № 1. – С. 70-74.
10. Кедельбаев Б.Ш. Получение полисахаридов из пшеничной соломы / Б.Ш. Кедельбаев // Архивариус. – 2016. – № 5(9). – С. 623-657.

References

1. Lignocellulosic biomass to bioethanol: a comprehensive review with a focus on pretreatment / S.H. Mood et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 27. – P. 77-93. (In English).
2. The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials / S. Sun et al // Bioresource Technology. – 2016. – Vol. 199. – P. 49-58. (In English).
3. Acid hydrolysis of wheat straw: A kinetic study / E. Guerra-Rodríguez et al // Biomass and Bioenergy. – 2012. – Vol. 36. – P. 346-355. (In English).
4. A review on delignification of lignocellulosic biomass for enhancement of ethanol production potential / R. Singh et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 32. – P. 713-728. (In English).
5. Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass / H. Ostby et al // Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology. – 2020. – Vol. 47. P. 623-657. (In English).
6. Areeya S. Model predictive control of enzymatic hydrolysis reactor / S. Areeya, M. Sriariyanun // Springer. Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 251, E3. – P. 257-266. (In English).
7. Development of novel bioreactor control systems based on smart sensors and actuators / B. Wang et al // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2020. – Vol. 8. – Article 7. (In English).
8. Evstafev S.N. Aktivatsiya polisakharidov solomy pshenitsy dlya fermentativnogo gidroliza metodom vysokotemperaturnogo ehtanoliza / S.N. Evstafev, E.S. Fomina // Biotekhnologiya. – 2024. – Vol. 40, № 2. – S. 62-67. (In Russian).
9. Chemeris O.V. Fermentativnyi gidroliz solomy pshenitsy i yachmenya preparatom tsellyulaz griba *Ipex lacteus* / O.V. Chemeris // Problemy ehkologii i okhrany prirody tekhnogennogo regiona. – 2025. – № 1. – S. 70-74. (In Russian).
10. Kedelbaev B.Sh. Poluchenie polisakharidov iz pshenichnoi solomy / B.Sh. Kedelbaev // Arkhivarius. – 2016. – № 5(9). – S. 623-657. (In Russian).

Информация о финансировании

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992914).

Р.С. Бекбаева, М.Д. Сарбаева*, К.С. Бекбаев, Г.Б. Абдилова, Н.А. Айманбетов
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А
*e-mail: sarbayeva0104@mail.ru

БИДАЙ САБАНЫНАН ҚАНТТАРДЫ АЛУ ПРОЦЕСІН БАСҚАРУДЫҢ АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕСІН ҚЫШҚЫЛДЫҚ ЖӘНЕ ФЕРМЕНТАТИВТІ ГИДРОЛИЗДІ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ НЕГІЗІНДЕ ӨЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ЕНГІЗУ

Ұсынылған жұмыста динамикалық кинетикалық модельді модельге негізделген болжамды басқару контурына интеграциялау арқылы жүзеге асырылған бидай сабанының екі сатылы гидролизін басқарудың автоматтандырылған жүйесін өзірлеу және эксперименттік верификациялау нәтижелері берілген. Басқару объектісі сызықтық емес динамикамен, технологиялық шектеулердің болуымен және шикізат құрамының, соның ішінде целлюлоза, гемицеллюлоза және лигнин мөлшерінің өзгеруіне жоғары сезімталдықпен сипатталады, бұл болжамды басқару әдістерін қолдануды негіздейді.

АБЖ құрылымында иерархиялық архитектура іске асырылған: жергілікті PID-реттегіштер температуралық және рН режимдерін тұрақтандырады, ал модельге негізделген болжамды басқару температура, қысым және өңдеу уақыты бойынша шектеулерді ескере отырып, қант шығымын максимизациялау критерийі бойынша басқарушы әсерлерді оңтайландырады. Математикалық модель қышқылды гидролиз кинетикасын (гемицеллюлоза-ксилоза-фурфурол) және ферменттердің ингибировануі мен инактивациясын ескеретін модификацияланған Михаэлис-Ментен теңдеуіне негізделген ферментативті кезеңді қамтиды.

Басқару 1 минуттық қадаммен дискретті күй моделінде және өтпелі процестерді ескере отырып жүзеге асырылады. Жүйе деректерді жинау және визуализациялау үшін SCADA-мен біріктірілген бағдарламаланатын логикалық контроллер негізінде жүзеге асырылған. Эксперименттік апробация нәтижелері қант шығымының 76-85 %-ға дейін артуын, вариация коэффициентінің 4 %-ға дейін төмендеуін, ингибиторлар концентрациясының азаюын, тұрақтану уақыты мен энергия шығындарының қысқаруын, сондай-ақ жүйенің сыртқы әсерлер мен шикізат құрамының өзгерістеріне төзімділігін көрсетті.

Түйін сөздер: автоматтандырылған басқару жүйесі, болжамды модельдік басқару, математикалық модельдеу, гидролиз, бидай сабаны, лигноцеллюлозалық шикізат, қанттарды алу.

R.S. Bekbayeva, M.D. Sarbayeva*, K.S. Bekbayev, G.B. Abdilova, N.A. Aimanbetov
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka Street
*e-mail: sarbayeva0104@mail.ru

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR SUGAR EXTRACTION FROM WHEAT STRAW BASED ON MATHEMATICAL MODELING OF ACID AND ENZYMATIC HYDROLYSIS

The study presents the development and experimental verification of an automated control system for the two-stage hydrolysis of wheat straw, implemented through the integration of a dynamic kinetic model into a model predictive control framework. The control object is characterized by nonlinear dynamics, the presence of technological constraints, and sensitivity to variations in feedstock composition, including cellulose, hemicellulose, and lignin content, which justifies the application of predictive control methods.

The structure of the control system is based on a hierarchical architecture: local PID controllers ensure stabilization of temperature and pH conditions, while model predictive control optimizes control actions according to the criterion of maximizing sugar yield under constraints on temperature, pressure, and processing time. The mathematical model includes the kinetics of acid hydrolysis (hemicellulose-xylose-furfural) and the enzymatic stage based on a modified Michaelis-Menten equation accounting for enzyme inhibition and deactivation.

Control is implemented using a discrete state-space model with a time step of 1 minute, taking into account transient processes. The system is implemented on a programmable logic controller platform with SCADA integration for data acquisition and visualization. Experimental validation demonstrated an increase in sugar yield up to 76-85%, a reduction in the coefficient of variation to 4%, a decrease in inhibitor concentration, reduced stabilization time and energy consumption, as well as robustness to disturbances and variations in feedstock composition.

Key words: automated control system, mathematical modeling, hydrolysis, wheat straw, sugar extraction.

Сведения об авторах

Роза Серикжановна Бекбаева – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: roza.toghan3194@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3218-4591>.

Меруерт Даулетхановна Сарбаева* – докторант кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: sarbayeva0104@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3605-4531>.

Кайрат Серикжанович Бекбаев – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, заведующий кафедрой «Биоинженерные системы», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: k.bekbaev80@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9591-0370>.

Галия Бекеновна Абдилова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Биоинженерные системы», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: galiyaabdilova055@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6647-6314>.

Нургелди Алтынбекович Айманбетов – докторант кафедры «Биоинженерные системы», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: aimanbetov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9064-5636>.

Авторлар туралы мәліметтер

Роза Серікжанқызы Бекбаева – техника ғылымдарының кандидаты, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: roza.toghan3194@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3218-4591>.

Меруерт Даулетханқызы Сарбаева* – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: sarbayeva0104@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3605-4531>.

Қайрат Серікжанұлы Бекбаев – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Биоинженерлік жүйелер» кафедрасының меңгерушісі, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: k.bekbaev80@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9591-0370>.

Галия Бекенқызы Абдилова – техника ғылымдарының кандидаты, «Биоинженерлік жүйелер» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: galiyaabdilova055@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6647-6314>.

Нұргелді Алтынбекұлы Айманбетов – «Биоинженерлік жүйелер» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан; e-mail: aimanbetov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9064-5636>.

Information about the authors

Roza Bekbayeva – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: roza.toghan3194@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3218-4591>.

Meruert Sarbayeva* – PhD student of the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: sarbayeva0104@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3605-4531>.

Kairat Bekbayev – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Bioengineering Systems, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: k.bekbaev80@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9591-0370>.

Galiya Abdilova – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Bioengineering Systems, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: galiyaabdilova055@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6647-6314>.

Nurgeldi Aimanbetov – PhD student of the Department of Bioengineering Systems, Republic of Kazakhstan; e-mail: aimanbetov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9064-5636>.

Поступила в редакцию 30.03.2026

Поступила после доработки 06.05.2026

Принята к публикации 12.05.2026