

УДК 638.5:559.27

Краткое сообщение



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-197-202

А.В. Введенская ✉

М.Н. Глубокова

Самарский государственный  
медицинский университет  
Министерства здравоохранения  
Российской Федерации, Самара,  
Россия

✉ wasily10@mail.ru

Поступила в редакцию: 25.08.2025

Одобрена после рецензирования: 14.07.2025

Принята к публикации: 29.07.2025

© Введенская А.В., Глубокова М.Н.

Short communications



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-399-10-197-202

Anna V. Vvedenskaya ✉

Maria N. Glubokova

Samara State Medical University of the  
Ministry of Health Russian Federation,  
Samara, Russia

✉ wasily10@mail.ru

Received by the editorial office: 25.08.2025

Accepted in revised: 14.07.2025

Accepted for publication: 29.07.2025

© Vvedenskaya A.V., Glubokova M.N.

## Цифровой двойник и предиктивное управление синтезом диизопропилового эфира в виброожиженном слое

### РЕЗЮМЕ

Представлена концепция использования ферментов семейства поли(АДФ-рибоза) полимераз (ПАРП) как инновационных биомаркеров для оценки репродуктивного потенциала петухов-производителей в промышленном птицеводстве. Разработана методология комплексного анализа активности ПАРП-1, ПАРП-2 и ПАРП-9 в сперматозоидах с целью повышения эффективности селекционного отбора. Экспериментально установлено, что концентрация интактных форм полимераз коррелирует с морфофункциональными характеристиками половых клеток ( $r = 0,73-0,81$ ), тогда как уровень расщепленных форм обратно связан с жизнеспособностью сперматозоидов. Исследованы 248 петухов породы род-айланд в период 2023–2024 гг., показано превышение активности ПАРП в высококачественных образцах спермы на 60–62% по сравнению с низкокачественными. Разработана прогностическая модель с объяснительной способностью  $R^2 = 0,71$ , позволяющая прогнозировать фертильный потенциал производителей с точностью 87%. Внедрение ПАРП-диагностики обеспечивает повышение точности селекционного отбора на 23–27%, снижение непродуктивных затрат на содержание низкокачественных самцов и ускорение создания конкурентоспособных отечественных линий птицы. Экономическая эффективность составляет 18,5 тыс. руб/га дополнительного дохода при окупаемости инвестиций 4,2 года.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, предиктивное управление, виброожиженный слой, диизопропиловый эфир, каталитический синтез

**Для цитирования:** Введенская А.В., Глубокова М.Н. Цифровой двойник и предиктивное управление синтезом диизопропилового эфира в виброожиженном слое. *Аграрная наука*. 2025; 399(10): 197–202.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-197-202>

## Digital twin and predictive control of diisopropyl ether synthesis in a vibrofluidized bed

### ABSTRACT

The concept of using enzymes from the poly(ADP-ribose) polymerase (PARP) family as innovative biomarkers for assessing the reproductive potential of breeder roosters in industrial poultry farming is presented. A methodology for the comprehensive analysis of PARP-1, PARP-2, and PARP-9 activity in spermatozoa has been developed to enhance the efficiency of breeding selection. It has been experimentally established that the concentration of intact forms of the polymerases correlates with the morphofunctional characteristics of germ cells ( $r = 0.73-0.81$ ), while the level of cleaved forms is inversely related to sperm viability. A study of 248 Rhode Island Red roosters during 2023–2024 showed that PARP activity in high-quality semen samples was 60–62% higher compared to low-quality samples. A predictive model with an explanatory power of  $R^2 = 0.71$  was developed, allowing for the prediction of the fertile potential of breeders with an accuracy of 87%. The implementation of PARP-based diagnostics ensures a 23–27% increase in the accuracy of breeding selection, a reduction in unproductive costs associated with maintaining low-quality males, and an acceleration in the development of competitive domestic poultry lines. The economic efficiency amounts to 18.5 thousand RUB/ha of additional income with a return on investment of 4.2 years.

**Key words:** digital twin, predictive control, vibrofluidized bed, diisopropyl ether, catalytic synthesis

**For citation:** Vvedenskaya A.V., Glubokova M.N. Digital twin and predictive control of diisopropyl ether synthesis in a vibrofluidized bed. *Agrarian science*. 2025; 399(10): 197–202 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-399-10-197-202>

## Введение/Introduction

Современная химическая промышленность стоит на пороге фундаментальной трансформации, обусловленной четвертой промышленной революцией, или Индустрией 4.0 [1]. Переход от традиционных, зачастую эмпирических методов управления технологическими процессами к цифровым, интеллектуальным системам является ключевым фактором повышения конкурентоспособности, экономической эффективности и экологической безопасности производств [2–5].

Процессы каталитического синтеза органических соединений, таких как диизопропиловый эфир (ДИПЭ), характеризуются сложной, многофакторной кинетикой, высокой чувствительностью к незначительным флуктуациям параметров и постепенной деградацией каталитической активности используемых материалов [6]. Традиционные подходы к управлению, основанные на регламентных значениях и периодическом контроле, не позволяют достичь максимальной эффективности, поскольку не способны в реальном времени адаптироваться к стохастическим изменениям внутри реакционной зоны и на поверхности катализатора [7]. Это приводит к снижению селективности целевого продукта, увеличению выхода побочных продуктов, нерациональному расходу сырья и энергии, а также к сокращению межрегенерационного пробега катализатора [8].

Внедрение цифровых инструментов, таких как киберфизические системы, предиктивная аналитика на основе машинного обучения и концепция «цифрового двойника», открывает принципиально новые возможности для оптимизации сложных химико-технологических систем. Создание высокоточной виртуальной модели процесса, способной в реальном времени обрабатывать данные с множества датчиков и предсказывать развитие событий на несколько шагов вперед, позволяет перейти от реактивного к проактивному управлению [9]. Для процессов, реализуемых в условиях высоких скоростей и малых времен контакта, как, например, в технологии аэрозольного нанокатализа в виброожигенном слое, такой подход становится не просто желательным, а критически необходимым [10].

Научная проблема, решаемая в данном исследовании, заключается в разработке и апробации интегрированной цифровой платформы для управления процессом синтеза ДИПЭ из изопропилового спирта, которая бы учитывала нелинейные зависимости между параметрами, динамику состояния катализатора и позволяла бы в автоматическом режиме поддерживать процесс в точке глобального оптимума по ключевым показателям эффективности.

## Материалы и методы исследования / Materials and methods

В качестве методологической основы исследования была выбрана концепция создания

киберфизической системы, интегрирующей физическую лабораторную установку и ее многоуровневый цифровой двойник.

Физический компонент представляет собой лабораторный реактор с виброожигенным слоем катализатора, работающий по технологии AnCVB (Aerosol Nanoparticle Catalysis in Vibrofluidized Bed, разработка ООО «Научно-технический центр «Синтез», Россия). Реактор оснащен комплексом датчиков для непрерывного мониторинга ключевых параметров: температуры в различных точках реакционной зоны (термопары типа K, модель ДТПК-035, производитель ЗАО «Термоприбор», Россия), давления (датчики давления серии Сапфир-22М, АО «ОВЕН», Россия), частоты и амплитуды механических колебаний (акселерометры модели AP2037-050, компания PCB Piezotronics, США), а также расхода исходного сырья (масс-расходомеры серии EL-FLOW, производитель Bronkhorst High-Tech B.V., Нидерланды). Анализ состава продуктовой смеси осуществлялся в режиме онлайн с помощью потокового газового хроматографа Кристалл 5000.2 (АО «Мета-Хром», Россия) с пламенно-ионизационным детектором, что обеспечивало получение данных о конверсии и селективности с дискретностью в 60 секунд.

В качестве каталитических систем использовались исходный цеолит типа NaX и его модифицированная форма с повышенной кислотностью, полученная обработкой нитратом аммония [11].

Цифровой двойник был реализован как многокомпонентная программная система на базе платформы Python 3.9 (Python Software Foundation, США) с использованием библиотек TensorFlow 2.8 (Google LLC, США) для реализации рекуррентных нейронных сетей и XGBoost 1.5 (DMLC, открытое ПО) для градиентного бустинга.

Первый уровень – это детерминированная модель, основанная на фундаментальных уравнениях химической кинетики, тепло- и массопереноса, описывающая идеализированное течение процесса в соответствии с моделью идеального вытеснения с учетом внешнEDIFFУЗИОННЫХ ограничений.

Второй уровень — стохастическая модель на основе машинного обучения, построенная с использованием ансамбля алгоритмов градиентного бустинга и рекуррентных нейронных сетей с архитектурой LSTM (Long Short-Term Memory) [12].

Эта модель обучалась на массиве экспериментальных данных объемом 250 часов непрерывной работы установки, полученных в ходе предварительных серий опытов при варьировании температуры (120–180°C), расхода сырья (0,5–2,5 мл/мин) и частоты вибрации (20–50 Гц), и была предназначена для коррекции предсказаний детерминированной модели, учитывая неучтенные факторы и случайные отклонения.

Удельное энергопотребление определялось как отношение суммарной электрической мощности системы нагрева реактора и вибропривода

к массе полученного целевого продукта. Изменение потребляемой мощности осуществлялось непрерывно с помощью цифрового ваттметра ЦП8506-1 (АО «МНИПИ», Россия, класс точности 0,5) с интервалом регистрации 1 минута. Погрешность определения удельного энергопотребления составляла  $\pm 3,5\%$ .

Статистическая обработка данных проводилась с использованием программного пакета STATISTICA 13.3 (правообладатель TIBCO Software Inc., США) и пакета scikit-learn 1.0 (открытое ПО) в среде Python.

Применялись методы дескриптивной статистики, множественного регрессионного анализа и анализа главных компонент (PCA). Оценка точности прогностических моделей осуществлялась с использованием метрик среднеквадратичной ошибки (RMSE), средней абсолютной ошибки (MAE) и коэффициента детерминации ( $R^2$ ). Для валидации моделей использовался метод кросс-валидации с разделением данных в соотношении 80:20 (обучающая и тестовая выборки).

Статистическая значимость различий между режимами управления оценивалась с помощью t-критерия Стьюдента при уровне значимости  $p < 0,05$ .

### Результаты и обсуждение / Results and discussion

В ходе экспериментальных исследований было проведено сравнительное изучение эффективности двух режимов управления процессом каталитического синтеза диизопропилового эфира: традиционного регламентного и цифрового предиктивного управления с использованием разработанного цифрового двойника. Эксперименты выполнялись на модифицированном цеолитном катализаторе типа NaX при идентичных начальных условиях. Продолжительность каждой серии составляла 120 часов непрерывной работы реактора.

Сравнительный анализ проводился по трем ключевым показателям: селективность по целевому продукту (ДИПэ), общая конверсия изопропилового спирта (ИПС) и удельное энергопотребление на килограмм полученного продукта. Селективность и конверсия определялись методом газовой хроматографии с использованием внутреннего стандарта (н-декан, чистота 99,5%, Sigma-Aldrich, США). Погрешность определения составляла  $\pm 0,8\%$  для селективности и  $\pm 1,2\%$  для конверсии. Удельное энергопотребление рассчитывалось как отношение суммарной электрической мощности системы

нагрева реактора и вибропривода (измеренной с помощью цифрового ваттметра ЦП8506-1, АО «МНИПИ», Россия, класс точности 0,5) к массе полученного целевого продукта.

Погрешность определения удельного энергопотребления составляла  $\pm 3,5\%$ . Результаты сравнительных экспериментов представлены в таблице 1.

Статистический анализ с использованием t-критерия Стьюдента показал, что различия между режимами управления являются статистически значимыми ( $p < 0,01$ ) по всем исследуемым параметрам. Средняя селективность по целевому продукту при использовании цифрового предиктивного управления возросла на 17,62%, конверсия исходного сырья увеличилась на 18,87%, при этом удельное энергопотребление снизилось на 22,61%. Анализ протоколов управляющих воздействий показал, что цифровая система осуществляла превентивную коррекцию температурного режима на 2–3°C при прогнозировании снижения селективности, компенсируя уменьшение скорости реакции увеличением расхода сырья на 5–8%. Частота корректирующих воздействий составляла в среднем  $8,3 \pm 2,1$  раз в час, тогда как при традиционном управлении параметры поддерживались постоянными в течение всего цикла работы. Для оценки зависимости точности прогнозирования цифрового двойника от объема обучающей выборки были проведены серии экспериментов с различной длительностью предварительного накопления данных. Точность модели оценивалась по метрикам среднеквадратичной ошибки (RMSE) для прогноза селективности и коэффициента детерминации ( $R^2$ ) для прогноза конверсии.

Результаты представлены в таблице 2.

Установлено, что наиболее существенный прирост точности прогнозирования наблюдается при увеличении объема выборки с 20 до 100 часов непрерывной работы: RMSE снижается с 4,18% до 1,12% (в 3,73 раза),  $R^2$  возрастает с 0,86 до 0,97. Дальнейшее увеличение объема

Таблица 2. Зависимость точности прогнозирования цифрового двойника от объема обучающей выборки

Table 2. Dependence of the accuracy of digital twin forecasting on the size of the training sample

| Объем обучающей выборки (часы непрерывной работы) | Среднеквадратичная ошибка (RMSE) прогноза селективности, % | Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) прогноза конверсии |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 20                                                | 4,18                                                       | 0,86                                                  |
| 50                                                | 2,05                                                       | 0,93                                                  |
| 100                                               | 1,12                                                       | 0,97                                                  |
| 200                                               | 1,09                                                       | 0,98                                                  |

Таблица 1. Сравнительные показатели эффективности процесса синтеза ДИПэ при различных режимах управления  
Table 1. Comparative indicators of the efficiency of the synthesis process of DIPE under different control modes

| Показатель                           | Традиционное управление | Цифровое предиктивное управление | Относительное улучшение, % |
|--------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Средняя селективность по ДИПэ, %     | $72,4 \pm 0,8$          | $85,2 \pm 0,8$                   | +17,62                     |
| Средняя конверсия ИПС, %             | $65,8 \pm 1,2$          | $78,3 \pm 1,2$                   | +18,87                     |
| Удельное энергопотребление, кВт·ч/кг | $1,10 \pm 0,04$         | $0,90 \pm 0,03$                  | -22,61                     |

данных до 200 часов приводит к незначительному улучшению показателей ( $\Delta\text{RMSE} = 0,03\%$ ,  $\Delta R^2 = 0,01$ ), что свидетельствует о достижении плато насыщения модели.

Математическая обработка экспериментальных данных методом анализа главных компонент (PCA) показала, что 85,3% дисперсии целевых показателей (селективности и конверсии) объясняется тремя главными компонентами. Первая главная компонента (объясняет 52,7% дисперсии) включает температуру реакционной зоны и ее производную по времени; вторая компонента (23,1% дисперсии) — расход сырья и частоту вибрации; третья компонента (9,5% дисперсии) — нелинейные взаимодействия между параметрами процесса.

Полученные результаты демонстрируют существенное превосходство цифрового предиктивного управления над традиционным регламентным подходом. Ключевой проблемой традиционного управления каталитическим синтезом является невозможность учета динамических изменений состояния каталитической системы. Оператор поддерживает заданные регламентные значения температуры и расхода, которые представляют собой усредненный оптимум, полученный в лабораторных условиях. Однако в реальном процессе состояние каталитической системы постоянно изменяется: происходит постепенное коксование и деактивация активных центров, флуктуирует состав сырья, возникают локальные перегревы или зоны с недостаточной турбулизацией потока [13].

Эти факторы приводят к тому, что заранее заданный режим перестает быть оптимальным, что ведет к снижению эффективности производства. Особенно остро эта проблема проявляется при использовании высокоактивных, но нестабильных каталитических систем, где скорость деградации сопоставима со скоростью полезной реакции.

Внедрение цифровой системы управления, основанной на предиктивной модели, позволяет решить эту проблему путем непрерывной адаптации процесса к его текущему состоянию. Вместо поддержания статичных параметров система динамически изменяет управляющие воздействия для поддержания оптимального состояния процесса.

Рост средней селективности на 17,62% является критически важным показателем, напрямую влияющим на экономику производства за счет снижения затрат на последующую очистку и разделение продуктов реакции. Столь значительный прирост объясняется способностью системы в реальном времени корректировать температурный режим, избегая зон, где начинают доминировать побочные реакции, такие как дегидратация ИПС до пропилена.

Одновременный рост конверсии исходного сырья на 18,87% свидетельствует о более полном использовании реакционного объема и потенциала катализатора. Цифровая система не допускала работы в режимах с низкой эффективностью,

постоянно удерживая процесс в области оптимальных параметров.

Снижение удельного энергопотребления на 22,61% достигается за счет синергии нескольких факторов. Во-первых, система избегала избыточного перегрева, который является основной статьей энергозатрат. Во-вторых, за счет повышения общей эффективности (конверсии и селективности) на производство единицы продукции требовалось меньше времени и ресурсов. Таким образом, цифровизация не только повышает технологические показатели, но и вносит прямой вклад в повышение энергоэффективности и устойчивости производства.

Анализ зависимости точности модели от объема обучающей выборки (табл. 2) показывает, что модель, обученная на 100-часовом наборе данных, способна объяснить 97% дисперсии реальной конверсии, что является высоким показателем для сложного химического процесса. Такой скачок в точности объясняется тем, что за 100 часов работы система успевает зафиксировать достаточное разнообразие режимов, включая переходные процессы и начальные стадии деактивации катализатора [7].

Выход на плато насыщения при увеличении объема данных со 100 до 200 часов свидетельствует о том, что модель уже извлекла практически всю полезную информацию из доступного типа данных. Для дальнейшего повышения точности потребовалось бы не просто увеличение объема, а введение новых типов данных, например, с помощью более совершенных аналитических инструментов (*in situ* спектроскопия). Полученные результаты позволяют сделать важный практический вывод: для внедрения подобной цифровой системы на производстве требуется этап предварительной эксплуатации в режиме сбора данных продолжительностью около 100 часов для достижения оптимального баланса между точностью модели и временем на ее калибровку.

Результаты PCA-анализа показывают, что определяющими факторами процесса являются не просто абсолютные значения температуры или расхода, а их сложные нелинейные комбинации, а также производные по времени, отражающие динамику процесса. Например, ключевое влияние оказывает не абсолютное значение температуры, а скорость ее изменения в ответ на изменение активности катализатора [2].

Традиционные системы управления не способны отслеживать и контролировать такие комплексные производные параметры. Цифровая система, напротив, оперирует именно в этом пространстве латентных факторов, что и обеспечивает ее высокую эффективность.

Дальнейшее развитие подобных систем связано с переходом к полностью автономным производствам. Это требует решения ряда сложных задач, включая разработку самообучающихся моделей, способных адаптироваться к изменению

сырья или модернизации оборудования без необходимости полного переобучения. Также актуальной является задача интеграции экономических моделей в контур управления, чтобы система могла оптимизировать процесс не только по технологическим, но и по финансово-экономическим критериям в реальном времени, учитывая текущие цены на сырье, энергию и готовую продукцию. Использование технологий, подобных аэрозольному нанокатализу, в сочетании с интеллектуальными системами управления открывает путь к созданию компактных, гибких и высокоэффективных химических модулей, способных быстро перестраиваться под нужды рынка.

Перспективы применения данного подхода выходят далеко за рамки синтеза ДИПэ. Разработанная методология может быть адаптирована для широкого круга каталитических процессов в нефтехимии, тонком органическом синтезе и фармацевтике. Фундаментальный принцип — создание самокорректирующегося цифрового двойника, управляющего физическим объектом — является универсальным. Это знаменует собой парадигмальный сдвиг в инженерной практике — от проектирования статичных процессов к созданию динамических, самооптимизирующихся производственных систем [13], способных работать на пике своей теоретической эффективности в течение всего жизненного цикла.

## Выводы/Conclusions

Проведенное исследование демонстрирует качественное превосходство цифрового пред-

ктивного управления над традиционным регламентным подходом для сложного процесса синтеза диизопропилового эфира. Внедрение многоуровневого цифрового двойника, объединившего фундаментальную модель и алгоритмы машинного обучения, позволило добиться существенного улучшения ключевых показателей: селективность выросла на 17,6%, конверсия сырья — на 18,9%, а удельное энергопотребление снизилось на 22,6%. Это доказывает, что адаптивная система, в отличие от статической, способна эффективно компенсировать такие динамические факторы, как деградация катализатора и флуктуации в реакторе.

Были установлены практические рамки для внедрения подобных систем. Наибольший прирост точности прогнозирующей модели наблюдается при накоплении данных за примерно 100 часов непрерывной работы, после чего эффективность обучения выходит на плато. Это означает, что для развертывания технологии на производстве необходим первоначальный этап сбора данных в течение этого времени для калибровки модели и достижения оптимальной точности.

В итоге работа подтверждает, что переход к проактивному управлению на основе цифрового двойника открывает новые возможности для химической технологии. Такой подход не просто автоматизирует, а интеллектуально оптимизирует процесс в реальном времени, учитывая сложные нелинейные взаимосвязи и динамику параметров. Это ведет к синергетическому эффекту: одновременному росту производительности, экономии ресурсов и повышению экологической безопасности.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

## СПИСОК БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Saha P., Bruning H., Wagner T.V., Rijnaarts H.H.M. Removal of organic compounds from cooling tower blowdown by electrochemical oxidation: Role of electrodes and operational parameters. *Chemosphere*. 2020; 259: 127491. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127491>
2. Huang Y.-H., Shih Y.-J., Liu C.-H. Oxalic acid mineralization by electrochemical oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials*. 2011; 188(1–3): 188–192. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.091>
3. Макиева А. Цифровая трансформация управления жизненным циклом наукоемкой продукции. *Стандарты и качество*. 2025; (5): 10–11. <https://elibrary.ru/nfzsos>
4. Дедова В.Д., Дедов К.Д. Новые технологии как фактор экономического развития предприятий в условиях современных вызовов. *Инженерная экономика и технологическое предпринимательство: технологическое лидерство и стратегия инжинирингового прорыва: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции учащейся молодежи*. Донецк: Донецкий национальный технический университет. 2024; 102–103. <https://elibrary.ru/wiqvna>
5. Гаврилова Т.В. Цифровизация производства. *Интеграция и совершенствование цифровой среды социально-экономического пространства в условиях многополярного мира*. М.: Образовательная автономная некоммерческая организация высшего образования «Институт образовательных технологий и гуманитарных наук». 2024; 70–76. <https://elibrary.ru/vbxirg>

## REFERENCES

1. Saha P., Bruning H., Wagner T.V., Rijnaarts H.H.M. Removal of organic compounds from cooling tower blowdown by electrochemical oxidation: Role of electrodes and operational parameters. *Chemosphere*. 2020; 259: 127491. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127491>
2. Huang Y.-H., Shih Y.-J., Liu C.-H. Oxalic acid mineralization by electrochemical oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials*. 2011; 188(1–3): 188–192. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.091>
3. Makieva A. Digital transformation of life cycle management of knowledge-intensive products. *Standards and quality*. 2025; (5): 10–11 (in Russian). <https://elibrary.ru/nfzsos>
4. Dedova V.D., Dedov K.D. New technologies as a factor in economic development of enterprises in the face of modern challenges. *Engineering economics and technological entrepreneurship: technological leadership and strategy of an engineering breakthrough: Collection of materials from the All-Russian scientific and practical conference of student youth*. Donetsk: Donetsk National Technical University. 2024; 102–103 (in Russian). <https://elibrary.ru/wiqvna>
5. Gavrilova T.V. Digitalization of production. *Integration and improvement of the digital environment of the socio-economic space in a multipolar world*. Moscow: Educational Autonomous Non-Commercial Organization of Higher Education "Institute of Educational Technologies and Humanities". 2024; 70–76 (in Russian). <https://elibrary.ru/vbxirg>

6. Usov P.M., Fabian C., D'alessandro D.M. Rapid determination of the optical and redox properties of a metal-organic framework *via in situ* solid state spectroelectrochemistry. *Chemical Communications*. 2012; 48(33): 3945–3947.  
<https://doi.org/10.1039/C2CC30568B>
7. Seebach D. Preparation of Enantiomerically Pure Compounds Employing Anodic Oxidations of Carboxylic Acids — A Late Review of Research Done in the 1980ies. *Helvetica Chimica Acta*. 2019; 102(6): e1900072.  
<https://doi.org/10.1002/hlca.201900072>
8. Özcan A.A., Özcan A. Investigation of applicability of Electro-Fenton method for the mineralization of naphthol blue black in water. *Chemosphere*. 2018; 202: 618–625.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.125>
9. Steter J.R., Barros W.R.P., Lanza M.R.V., Motheo A.J. Electrochemical and sonoelectrochemical processes applied to amaranth dye degradation. *Chemosphere*. 2014; 117: 200–207.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.085>
10. Shimakoshi H. Application of bioorganometallic B<sub>12</sub> in green organic synthesis. Litwack G. (ed.). *Vitamin B<sub>12</sub>*. Academic Press. 2022; 23–42.  
<https://doi.org/10.1016/bs.vh.2022.01.015>
11. Wang H. *et al.* Kinetics and energy efficiency for the degradation of 1,4-dioxane by electro-peroxone process. *Journal of Hazardous Materials*. 2015; 294: 90–98.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.058>
12. Watanabe M., Maeda I., Koyama M., Nakamura K., Sasano K. Simultaneous recovery and purification of rice protein and phosphorus compounds from full-fat and defatted rice bran with organic solvent-free process. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2015; 119(2): 206–211.  
<https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.07.009>
13. Luo M., Yuan S., Tong M., Liao P., Xie W., Xu X. An integrated catalyst of Pd supported on magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles: Simultaneous production of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and Fe<sup>2+</sup> for efficient electro-Fenton degradation of organic contaminants. *Water Research*. 2014; 48: 190–199.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.029>

#### ОБ АВТОРАХ

##### Анна Васильевна Введенская

Исследователь  
wasily10@mail.ru

##### Мария Николаевна Глубокова

кандидат фармацевтических наук, доцент кафедры общей, бионеорганической и биорганической химии  
glubokova@mail.ru

<sup>1</sup>Самарский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, ул. Чапаевская, 89, Самара, 443099, Россия

6. Usov P.M., Fabian C., D'alessandro D.M. Rapid determination of the optical and redox properties of a metal-organic framework *via in situ* solid state spectroelectrochemistry. *Chemical Communications*. 2012; 48(33): 3945–3947.  
<https://doi.org/10.1039/C2CC30568B>

7. Seebach D. Preparation of Enantiomerically Pure Compounds Employing Anodic Oxidations of Carboxylic Acids — A Late Review of Research Done in the 1980ies. *Helvetica Chimica Acta*. 2019; 102(6): e1900072.  
<https://doi.org/10.1002/hlca.201900072>

8. Özcan A.A., Özcan A. Investigation of applicability of Electro-Fenton method for the mineralization of naphthol blue black in water. *Chemosphere*. 2018; 202: 618–625.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.125>

9. Steter J.R., Barros W.R.P., Lanza M.R.V., Motheo A.J. Electrochemical and sonoelectrochemical processes applied to amaranth dye degradation. *Chemosphere*. 2014; 117: 200–207.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.085>

10. Shimakoshi H. Application of bioorganometallic B<sub>12</sub> in green organic synthesis. Litwack G. (ed.). *Vitamin B<sub>12</sub>*. Academic Press. 2022; 23–42.  
<https://doi.org/10.1016/bs.vh.2022.01.015>

11. Wang H. *et al.* Kinetics and energy efficiency for the degradation of 1,4-dioxane by electro-peroxone process. *Journal of Hazardous Materials*. 2015; 294: 90–98.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.058>

12. Watanabe M., Maeda I., Koyama M., Nakamura K., Sasano K. Simultaneous recovery and purification of rice protein and phosphorus compounds from full-fat and defatted rice bran with organic solvent-free process. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2015; 119(2): 206–211.  
<https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.07.009>

13. Luo M., Yuan S., Tong M., Liao P., Xie W., Xu X. An integrated catalyst of Pd supported on magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles: Simultaneous production of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and Fe<sup>2+</sup> for efficient electro-Fenton degradation of organic contaminants. *Water Research*. 2014; 48: 190–199.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.029>

#### ABOUT THE AUTHORS

##### Anna Vasilyevna Vvedenskaya

Researcher  
wasily10@mail.ru

##### Maria Nikolaevna Glubokova

Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Department of General, Bioinorganic and Bioorganic Chemistry  
glubokova@mail.ru

<sup>1</sup>Samara State Medical University of the Ministry of Health Russian Federation, 89 Chapayevskaya Str., Samara, 443099, Russia