

DOI: 10.47188/0869-5326_2022_30_4_52

УДК 628.3:621.3

Оценка эффективности параметров безреагентной электролизной очистки сточных вод от азотсодержащих соединений

**© 2022 В. Н. Штепа¹, С. Ю. Киреев², А. В. Козырь¹,
А. Б. Шикунец¹, Л. В. Наумов², С. Н. Киреева²**

¹ Полесский государственный университет, 225710 Пинск,
ул. Днепровской флотилии, 23, Брестская область, Республика Беларусь,
e-mail: tppoles@gmail.com

² Пензенский государственный университет, ул. 440026 Пенза, ул. Красная, 40, Российская Федерация, тел.: +7(905) 367-43-80, e-mail: dean_fptet@pnzgu.ru

Проанализирована актуальность очистки сточных вод от азотсодержащих соединений, в том числе с использованием процессов стационарного и нестационарного электролиза. Разработана конструкция, изготовлен и испытан в условиях реального производства гидробионтов безреагентный электрохимический модуль водообработки. Приведены результаты исследования влияния режимов электропитания электролизного блока на редукцию азота аммонийного, аммиака, нитритов и нитратов из оборотного раствора установки промышленной аквакультуры. Результаты исследования показали, что при использовании стационарного и нестационарного режима электролиза процессы преобразования азотсодержащих соединений в целом выполняются согласно классическому алгоритму: повышение концентрации соединений по цепочке «азот аммонийный нитриты нитраты», а применение нестационарного электролиза для удаления азотсодержащих соединений из раствора для выращивания гидробионтов более эффективно. Анализ полученных результатов продемонстрировал эффективность предлагаемого подхода и возможность масштабирования результатов на коммунально-промышленные объекты. Преимуществами предлагаемого метода являются: безреагентность, мобильность, возможность автоматизации процесса.

Ключевые слова: стационарный электролиз, нестационарный электролиз, безреагентные технологии, аквапоника, очистка воды, азотсодержащие соединения

UDC 628.3:621.3

Evaluation of the effectiveness of the parameters of reagent-free electrolysis wastewater treatment from nitrogen-containing compounds

© 2022 V. N. Shtepa¹, S. Yu. Kireev², A.V. Kozyr¹,
A. B. Shikunets¹, L. V. Naumov², S. N. Kireeva²

¹ Polesky State University, 225710 Pinsk,
Dneprovskaya Flotilla str., 23, Brest region, Republic of Belarus,
e-mail: tppoless@gmail.com

² Penza State University, 440026 Penza, Krasnaya str., 40, Russian Federation, tel.: +7(905)
367-43-80, e-mail: dean_fptef@pnzgu.ru

The relevance of wastewater treatment from nitrogen-containing compounds, including using stationary and non-stationary electrolysis processes, is analyzed. A design has been developed, a reagentless electrochemical water treatment module has been manufactured and tested in the conditions of real production of hydrobionts. The results of the study of the influence of the power supply modes of the electrolysis unit on the reduction of ammonium nitrogen, ammonia, nitrites and nitrates from the recycled solution of the industrial aquaculture plant are presented. The results of the study showed that when using stationary and non-stationary electrolysis modes, the conversion processes of nitrogen-containing compounds are generally performed according to the classical algorithm: increasing the concentration of compounds along the chain "ammonium nitrogen → nitrites → nitrates", and the use of non-stationary electrolysis to remove nitrogen-containing compounds from the solution for growing hydrobionts is more effective. The analysis of the results demonstrated the effectiveness of the proposed approach and the possibility of scaling the results to municipal and industrial facilities. The advantages of the proposed method are: non-reactivity, mobility, the possibility of automating the process.

Keywords: stationary electrolysis, non-stationary electrolysis, reagentless technologies, aquaponics, water purification, nitrogen-containing compounds

Введение

Сточные воды чрезвычайно разнообразны по своему составу и своим свойствам. При этом органические загрязнения бывают растительного и животного происхождения. К загрязнениям растительного происхождения относятся остатки овощей, фруктов, злаков, бумаги; в загрязнениях животной природы входят физиологические выделения людей, животных и гидробионтов, остатки их мышечных и жировых тканей, клейкие вещества [1]. Они характеризуются достаточно значительным содержанием азота.

Так в городских сточных водах главную часть органических азотистых соединений составляют ве-

щества белковой природы – фекалии и пищевые отходы. Неорганические соединения азота представлены восстановленными NH_4^+ и NH_3 и окисленными NO_2^- и NO_3^- формами. При этом значительное количество азота аммонийного образуется при гидролизе мочевины, являющейся конечным продуктом азотного обмена живых организмов [2].

В процессе биологической очистки сточных вод азот аммонийный частично превращается в белковый азот биомассы микроорганизмов и в определенных условиях может окисляться до нитритного и нитратного, что свидетельствует о высокой эффективности биологического процесса, поскольку его нитрифика-

ция начинается только после глубокого извлечения органических загрязнений. В свою очередь, в результате процесса биохимической денитрификации нитритный и нитратный азот могут восстанавливаться до поступающего в атмосферу молекулярного азота.

Однако биологическая очистка подвержена значительному негативному влиянию многих факторов: загрязнителей-токсикантов (угнетающих активный ил), колебаний pH, наличию тяжёлых металлов и массе других критических возмущающих воздействий.

Соответственно, актуальным является создание безреагентных технологий способных сглаживать негативное действие таких факторов на биохимические процессы или даже заменять их в сооружениях очистки сточных вод, например на основе использования электрохимических превращений [3].

Целью настоящей работы являлось исследование эффективности различных режимов электролизной обработки фактических сточных вод с максимальным приближением к реальным условиям работы сооружений очистки.

Анализ исследований других авторов

Вопросы электрохимической денитрификации актуальны уже более 100 лет [4 – 6]. В последние десятилетия им уделяется все больше внимания из-за экономической и экологической целесообразности, возможности автоматизации [7 – 12].

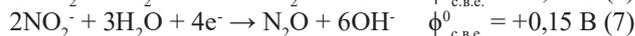
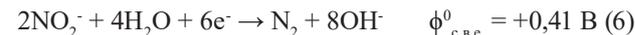
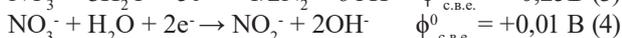
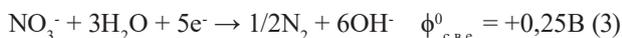
В нейтральных и слабощелочных водных растворах, содержащих ионы аммония, нитрат- и нитрит-анионы при пропускании электрического тока на поверхности электродов возможно протекание процессов, приводящих в конечном итоге к денитрификации – удалению азотсодержащих соединений. Одним из главных преимуществ этого метода является безреагентность, что позволяет использовать его, например, в качестве стадий водоподготовки в бессточных технологиях гидропоники, для выращивания гидробионтов, пищевой промышленности [13, 14].

Так, на катоде возможно протекание следующих реакций:

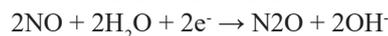
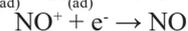
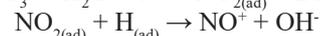
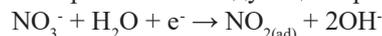


Реакции 1 и 2 могут протекать параллельно. В кислой среде водород преимущественно выделяется при восстановлении ионов гидроксония (реакция 2), однако при повышении значения pH возрастает доля реакции 1.

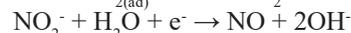
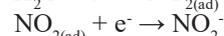
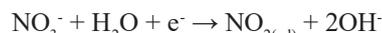
Азотсодержащие соединения также могут восстанавливаться на поверхности катода, при этом образуются различные продукты с более низкими степенями окисления азота:



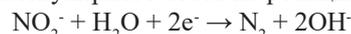
В процессе восстановления также может принимать участие атомарный водород, адсорбированный на поверхности катода. Так в соответствии с [7, 15], в диапазоне потенциалов -600...-900 мВ возможно последовательное протекание следующих процессов:



При смещении потенциала катода в область более отрицательных значений предлагается [15 – 17] следующий механизм:



Образующийся оксид азота (I) далее восстанавливается до молекулярного азота по реакции:



На поверхности анода протекают процессы окисления:

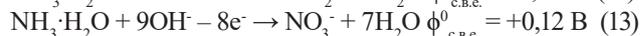
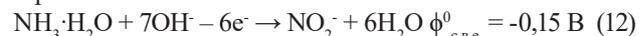


Процессы анодного окисления аммиака и ионов аммония в водных растворах исследовались еще с начала XX века [18 – 21].

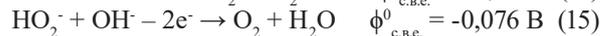
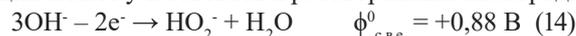
При низких значениях анодной плотности тока, когда потенциал анода не достигает потенциала окисления воды аммиак окисляется до молекулярного азота:



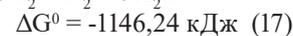
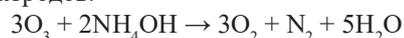
При повышении анодной плотности тока, потенциал анода достигает значений, при которых начинается окисление воды, что приводит к окислению аммиака до более высоких степеней окисления и объясняет образование нитритов и нитратов в прианодном пространстве.

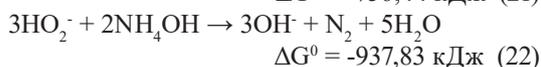
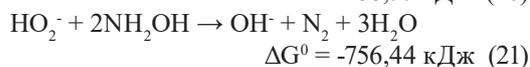
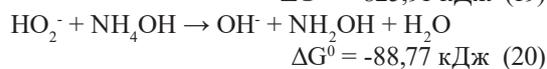
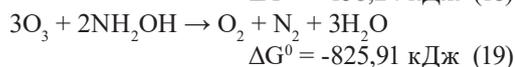


При высоких значениях анодной плотности тока создаются условия для протекания процессов окисления воды и гидроксид-анионов до пероксида и озона. В реакции может участвовать и растворенный кислород.



Вышеуказанные анодные продукты-сильные окислители, которые после десорбции с поверхности электрода способны окислять азотсодержащие соединения до молекулярного азота, объясняя продолжение процесса денитрификации после отключения поляризации электродов:





Повышение давления в электролизере способно снижать анодное перенапряжение и приводить к уменьшению напряжения на 0,07...0,08 В [22].

Использование источников импульсного тока для поляризации электродов приводит к интенсификации денитрификации. Это объясняется более высокими амплитудными значениями потенциала электрода при поляризации импульсами тока по сравнению с поляризацией электродов постоянным током [23].

Материалы и методы исследования

При проведении экспериментов для электрохимической обработки применяли воду из установки замкнутого водоснабжения (УЗВ) по выращиванию гидробионтов (сорт рыбы – клариевый сом). Для такого технологического объекта удаление азотистых со-

единений важная технологическая задача, поскольку загрязнение воды токсическими соединениями азота, в основном, связано с выделением рыбами аммония – практически единственного азотсодержащего продукта катаболизма аминокислот [24, 25]. В результате различных превращений аммония возникают другие токсические соединения азота – нитриты и нитраты, аммиак. Аммиак является главным стрессообразующим фактором. Согласно существующему отраслевому стандарту, максимальное содержание азота в форме аммиака, нитратов и нитритов при выращивании осетровых не должно превышать, соответственно, 0,05, 1,0 и 0,02 г/м³.

Вода из установки замкнутого водоснабжения по выращиванию гидробионтов проходила через несколько технологических стадий очистки, представленных на схеме (Рис. 1).

Схема электролизного блока и его подключения представлена на рисунке 2.

В качестве электродного (анодного и катодного) материала использовали куски графита, который засыпался в соответствующие пластиковые короба внутри электролизёра. Вольт-амперный режим работы во всех экспериментах: сила тока – 30 А±5А, напряжение – 22 В±3,5В.

В качестве источников питания использовали:

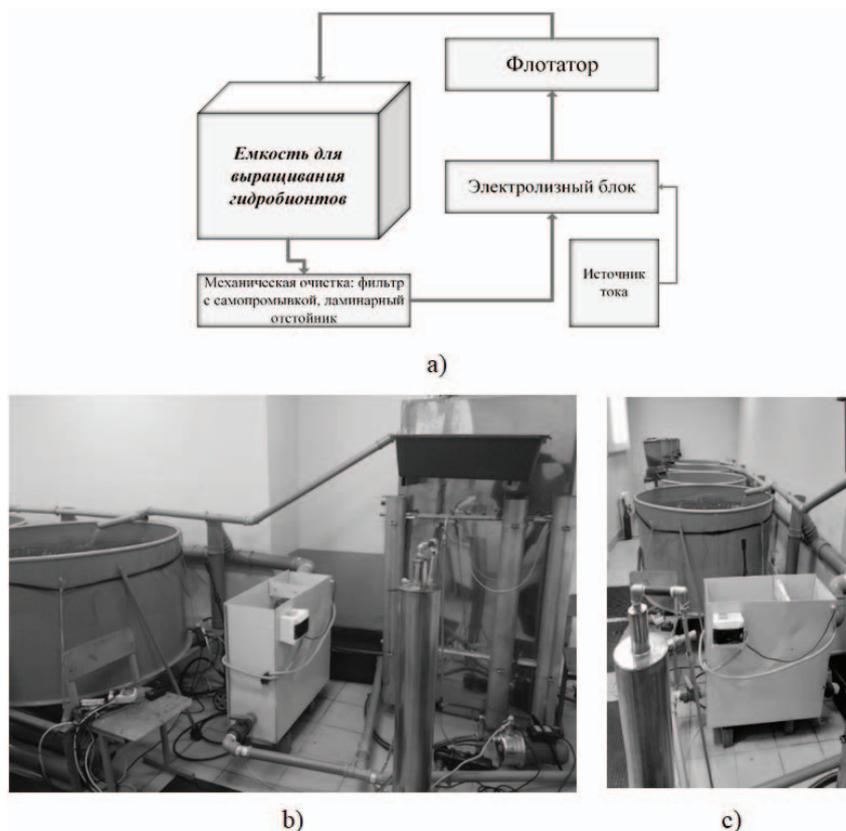


Рис. 1. Структурная схема (а) и внешний вид (б, в) электротехнологического комплекса очистки воды с использованием электролизной обработки

Fig. 1. Block diagram (a) and appearance (b, c) of the electrochemical complex of water purification using electrolysis treatment

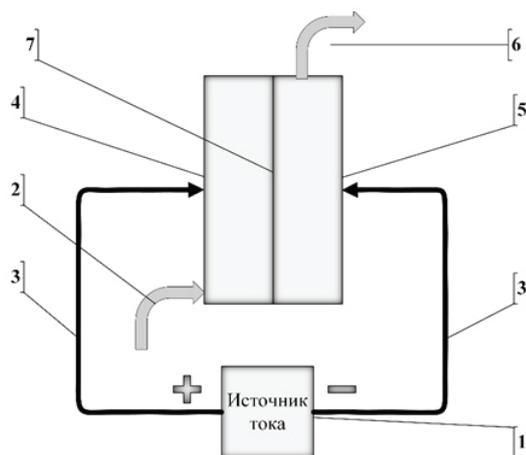


Рис. 2. Схема электролизного блока:

1 – источник тока, 2 – входной кран, 3 – токоподводы, 4 – анодная зона, 5 – катодная зона, 6 – выходной кран, 7 – неионоселективная (пассивная) мембрана

Fig. 2. Diagram of the electrolysis unit:

1 – current source, 2 – input valve, 3 – current leads, 4 – anode zone, 5 – cathode zone, 6 – output valve, 7 – non-ion-selective (passive) membrane

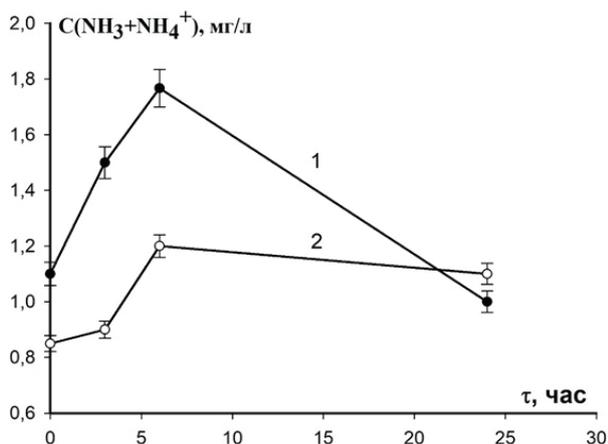


Рис. 3. Эффективность очистки водных растворов от $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ (аммиак, ионы азота аммонийного), мг/л (1 – нестационарный электролиз, 2 – стационарный электролиз)

Fig. 3. Efficiency of purification of aqueous solutions from $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ (ammonia, ammonium nitrogen ions), mg/l (1 – non-stationary electrolysis, 2 – stationary electrolysis)

1. гальванический высокочастотный инвертор «Smart GVI 30\60 V02» с линейной формой сигнала, обеспечивающий гальваностатический режим (стационарный электролиз);

2. инверторный источник тока на IGBT-транзисторах «Solaris MMA-251» с пилообразной формой силы тока (частота 50 Гц) (нестационарный электролиз).

Расход воды через электролизер (20 м³/сутки) был постоянным и поддерживался циркуляционным насосом. Электрический ток в электролизный блок подавался периодически. Один период электролиза соответствовал времени полного оборота воды из емкости

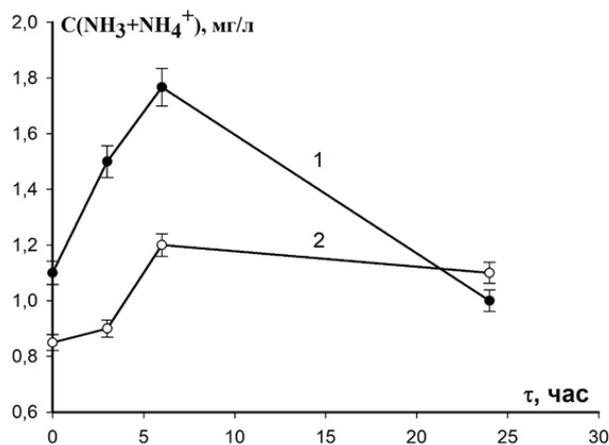


Рис. 4. Эффективность очистки водных растворов от NO_2^- (нитриты), мг/л (1 – нестационарный электролиз, 2 – стационарный электролиз)

Fig. 4. Efficiency of purification of aqueous solutions from NO_2^- (nitrites), mg/l (1 – non-stationary electrolysis, 2 – stationary electrolysis)

для выращивания гидробионтов через электролизер. Затем электрический ток выключался и следующий период начинался через 3 и 6 часов. После двух периодов (6 часов с начала эксперимента) электрический ток выключали и осуществляли дальнейшее измерение концентрации компонентов раствора спустя 24 часа.

Перед началом проведения эксперимента гидробионты кормились и после этого ожидался период 12 часов до начала исследований – с целью гарантированного загрязнения водного раствора УЗВ. После запуска эксперимента гидробионты не кормились для недопущения увеличения концентрации загрязнителей в водном растворе.

Для определения концентрации компонентов раствора использовали стандартные химические методы анализа, pH раствора измеряли лабораторным pH-метром И-161. Кислотность обрабатываемого раствора в ходе эксперимента колебалась в диапазоне 8,0...8,5.

Результаты и их обсуждение

Изменение концентрации азотсодержащих соединений (аммонийный азот, нитриты, нитраты) от времени эксперимента приведено на рисунках 3 – 5.

В тоже время флуктуационные выбросы показателей качества воды, представленные на рисунках 3 – 5, вызваны тем, что имеет место работа с биологическими объектами (рыбами) и вода загрязняется вторично в результате биохимических преобразований. В целом же полученные результаты эффективности удаления азотистых соединений технологически приемлемы для исследуемого биотехнологического объекта и могут значительно улучшить его продуктивность в целом.

Сравнивая эффективность удаления азотистых соединений из водных растворов УЗВ (рис. 1) по пред-

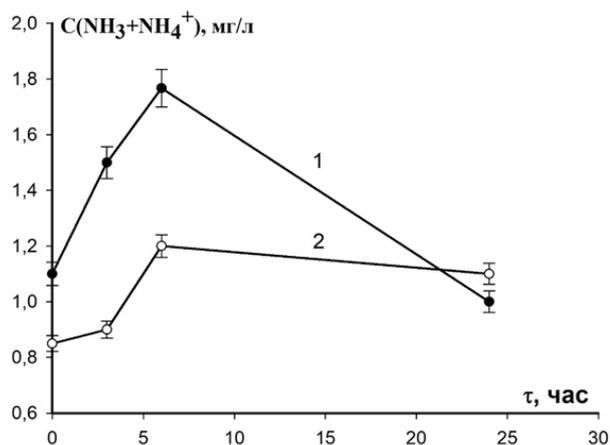


Рис. 5. Эффективность очистки водных растворов от NO_3^- (нитраты), мг/л (1 – нестационарный электролиз, 2 – стационарный электролиз)

Fig. 5. Efficiency of purification of aqueous solutions from NO_3^- (nitrates), mg/l (1 – non-stationary electrolysis, 2 – stationary electrolysis)

ложенной схеме электрохимического модуля (рис. 2) можно сделать следующие выводы (с учётом нестационарности показателей качества обрабатываемой воды):

- при использовании стационарного и нестационарного режима электролиза процессы преобразования азотсодержащих соединений в целом выполняются согласно классическому алгоритму: повышение концентрации соединений по цепочке «азот аммонийный → нитриты → нитраты»;

- после отключения источников питания через 24 часа происходит падение концентрации всех загрязнителей (в этот период гидробионты также не кормились – для недопущения попадания дополнительных загрязнителей в водный раствор), в том числе нитратов – что говорит о способности системы к «денитрификации» нитратов;

Литература

1. Marković J. T. et al. Risk assessment model for planning and design processes of wastewater treatment plants // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2021. V. 65, №. 1. P. 181-190.
2. Ownby M., Desrosiers D. A., Vaneekhaute C. Phosphorus removal and recovery from wastewater via hybrid ion exchange nanotechnology: A study on sustainable regeneration chemistries // *NPJ Clean Water*. 2021. V. 4, №. 1. P. 1-8.
3. Shtepa V. et al. Rationale for the combined use of biological processes and AOPs in wastewater treatment tasks // *Applied Sciences*. 2021. V. 11. №. 16. C. 7551.

- применение нестационарного электролиза для удаления азотсодержащих соединений из раствора для выращивания гидробионтов более эффективно.

Анализируя проведенные исследования, можно выделить ключевые преимущества перед аналогами предложенных подходов использования в очистке сточных вод электролизных процессов:

- технология очистки не использует реагентов (безреагентная), в отличие от классических химических решений;

- технологическая схема компактная и потенциально мобильная, с возможностью работать на базе автомобильного шасси для эксплуатации на удалённых территориях;

- электрохимические процессы очистки возможно в высокой степени автоматизировать [26], включая использование математического аппарата искусственно-го интеллекта.

Заключение

Исследования безреагентной электролизной обработки водных растворов с использованием электролизеров, включающих инертные электроды, показали их значительную эффективность при редукации азотистых соединений.

Электрохимические процессы очистки сточных вод обеспечивают технологическую стабилизацию концентрации загрязнителей – даже кормление гидробионтов, соответственно, и дополнительное внесение загрязнителей, не повлияло на гидрохимию водного раствора УЗВ (имеет место только квазистационарные во времени отклонения).

Перспективными исследованиями является создание управляемого импульсного источника тока с целью адаптивного подбора наиболее энергоэффективных режимов работы системы водообработки изменяя, согласно технологическим требованиям: режим электролиза, частоту и скважность тока, его форму, напряжение на электродах, силу тока в цепи.

References

1. Markovic J.T., Mucenski V., Savic D., Velkovski T., Pesko I., Tomas L. Risk assessment model for planning and design processes of wastewater treatment plants. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2021, vol. 65, no. 1, pp. 181-190. doi: 10.3311/PPci.16740.
2. Ownby M., Desrosiers D.A., Vaneekhaute C. Phosphorus removal and recovery from wastewater via hybrid ion exchange nanotechnology: A study on sustainable regeneration chemistries. *NPJ Clean Water*. 2021, – vol. 4, no. 1, pp. 1-8. doi: 10.1038/s41545-021-00104-7.
3. Shtepa V., Balintova M., Chernysh Y., Chubur V., Demcak S., Gautier M. Rationale for the combined use of biological processes and AOPs in wastewater

4. Jiang X. et al. Nitrification performance evaluation of activated sludge under high potassium ion stress during high-ammonia nitrogen organic wastewater treatment // *Journal of Environmental Sciences*. 2022. V. 111. P. 84-92.
5. Zhang J. et al. Wastewater COD characterization: RBCOD and SBCOD characterization analysis methods // *Scientific reports*. 2021. V. 11, №. 1. P. 1-10.
6. Müller E., Spitzer F. Über die Elektrolytische Oxydation des Ammoniaks und Ihre Abhängigkeit vom Anodenmaterial // *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie*. 1905. V. 11, №. 50. P. 917-931.
7. De D., Englehardt J. D., Kalu E. E. Electroreduction of Nitrate and Nitrite Ion on a Platinum Group Metal Catalyst Modified Carbon Fiber Electrode Chronoamperometry and Mechanism Studies // *Journal of the Electrochemical Society*. 2000. V. 147, №. 12. P. 4573
8. Paidar M., Bouzek K., Bergmann H. Influence of cell construction on the electrochemical reduction of nitrate // *Chemical Engineering Journal*. 2002. V. 85, № 2-3. P. 99-109
9. Bouzek K. et al. Electrochemical reduction of nitrate in weakly alkaline solutions // *Journal of Applied Electrochemistry*. 2001. V. 31, № 11. P. 1185-1193
10. Taguchi S., Feliu J. M. Kinetic study of nitrate reduction on Pt (1 1 0) electrode in perchloric acid solution // *Electrochimica Acta*. 2008. V. 53, № 10. P. 3626-3634
11. Souza-Garcia J. et al. Nitrate reduction on Pt single crystals with Pd multilayer // *Electrochimica Acta*. 2009. V. 54, № 7. C. 2094-2101.
12. Badea G. E. Electrocatalytic reduction of nitrate on copper electrode in alkaline solution // *Electrochimica Acta*. 2009. V. 54, № 3. P. 996-1001
13. Inagaki Y. et al. Field application of hydrogenotrophic denitrification with two-stage injection of electrolytic hydrogen // *Journal of Water Process Engineering*. 2020. V. 38. P. 101685
14. Kim Y.J. et al. Electrolytic denitrification with an ion-exchange membrane in groundwater // *Water Science and Technology: Water Supply*. 2015. V. 15, № 6. P. 1320-1325
15. Харламова Т. А., Атаманова Ю. Ю. Закономерности снижения концентрации фенола, цианидов и тиоцианатов комбинированным электрохимическим методом из хлорид- treatment tasks. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 16. pp. 7551. doi: 10.3390/app11167551.
4. Jiang X., Wang H., Wu P., Wang H., Deng L., Wang W. Nitrification performance evaluation of activated sludge under high potassium ion stress during high-ammonia nitrogen organic wastewater treatment. *Journal of Environmental Sciences*. 2022, vol. 111, no. 1, pp. 84-92. doi: 10.1016/j.jes.2021.03.007.
5. Zhang J., Shao Y., Liu G., Qi L., Wang H., Xu X., Liu S. Wastewater COD characterization: RBCOD and SBCOD characterization analysis methods. *Scientific reports*. 2021, vol. 11. no. 1. pp. 1-10. doi: 10.1038/s41598-020-80700-8.
6. Muller E., Spitzer F. Über die Elektrolytische Oxydation des Ammoniaks und Ihre Abhängigkeit vom Anodenmaterial [About the electrolytic oxidation of ammonia and its dependence on the anode material]. *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie*. 1905, vol. 11. no. 50. pp. 917-931. doi: 10.1002/bbpc.19050115002.
7. DeD., Englehardt J.D., Kalu E.E. Electroreduction of Nitrate and Nitrite Ion on a Platinum-Group-Metal Catalyst-Modified Carbon Fiber Electrode Chronoamperometry and Mechanism Studies. *Journal of the Electrochemical Society*. 2000, vol. 147, no. 12, pp. 4573. doi: 10.1149/1.1394103.
8. Paidar M., Bouzek K., Bergmann H. Influence of cell construction on the electrochemical reduction of nitrate. *Chemical Engineering Journal*. 2002, vol. 85, no. 2-3, pp. 99-109. doi: 10.1016/S1385-8947(01)00158-9.
9. Bouzek K., Paidar M., Sadilkova A., Bergmann H. Electrochemical reduction of nitrate in weakly alkaline solutions. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2001, vol. 31, no. 11, pp. 1185-1193. doi: 10.1023/A:1012755222981.
10. Taguchi S., Feliu J.M. Kinetic study of nitrate reduction on Pt (1 1 0) electrode in perchloric acid solution. *Electrochimica Acta*. 2008, vol. 53, no. 10, pp. 3626-3634. doi: 10.1016/j.electacta.2007.12.032.
11. Souza-Garcia J., Ticianelli E.A., Climent V., Feliu J.M. Nitrate reduction on Pt single crystals with Pd multilayer. *Electrochimica Acta*. 2009, vol. 54, no. 7, pp. 2094-2101. doi: 10.1016/j.electacta.2008.08.059.
12. Badea G.E. Electrocatalytic reduction of nitrate on copper electrode in alkaline solution. *Electrochimica Acta*. 2009, vol. 54, no. 3, pp. 996-1001. doi: 10.1016/j.electacta.2008.08.003.
13. Inagaki Y., Yamada D., Komori M., Sakakibara Y. Field application of hydrogenotrophic denitrification with two-stage injection of electrolytic hydrogen. *Journal of Water Process Engineering*. 2020, vol. 38, pp. 101685. doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101685.
14. Kim Y.J., Lee K., Cha H.Y., Yoo K.M., Jeon C.S., Kim H.J., Park K. Y. Electrolytic denitrification with an ion-exchange membrane in groundwater.

- но-сульфатных и аммиачных растворов // Гальванотехника и обработка поверхности. 2021. Т. 29, № 1. С. 38-46. – DOI 10.47188/0869-5326_2021_29_1_38
16. Shi L. et al. In situ electrochemical oxidation in electrodialysis for antibiotics removal during nutrient recovery from pig manure digestate // *Chemical Engineering Journal*. 2021. V. 413. 127485.
17. Kruszelnicka I. et al. Evaluation of surfactant removal efficiency in selected domestic wastewater treatment plants in Poland // *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2019. V. 17, № 2. P. 1257-1264. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40201-019-00387-6>
18. Dereszewska A. et al. The Effect of Anionic Surfactant Concentration on Activated Sludge Condition and Phosphate Release in Biological Treatment Plant // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2015. V. 24, № 1. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/28640>
19. Stasinakis A. S. Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment—a mini review // *Global NEST journal*. 2008. V. 10, № 3. P. 376-385.
20. Costa E. P. et al. New trend on open solar photoreactors to treat micropollutants by photo-Fenton at circumneutral pH: Increasing optical pathway // *Chemical Engineering Journal*. 2020. V. 385. 123982.
21. A Malvestiti J., F Dantas R. Influence of industrial contamination in municipal secondary effluent disinfection by UV/H₂O₂ // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. V. 26, № 13. P. 13286-13298.
22. Stanford C., Jiang J. Q., Alsheyab M. Electrochemical production of ferrate (iron VI): application to the wastewater treatment on a laboratory scale and comparison with iron (III) coagulant // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2010. V. 209, № 1. P. 483-488.
23. Киреев С. Ю. Интенсификация процессов электроосаждения металлов с использованием различных режимов импульсного электролиза // *Перспективные материалы*. 2016. № 11. С. 5-15
24. Штепа В.Н., Заец Н.А., Алексеевский Д.Г. Использование электролизных процессов в безреагентной водоочистке: удаление сероводорода, органического железа, синтетических поверхностно-активных веществ // *Энергетика и автоматика : научный журнал*. - 2021. № 2. С. 52-68
25. Черныш Е. Ю., Штепа В. Н., Пляцук Л. Д. и др. Анаэробное сбраживание птичьего помета с инокулятом активного ила в комбинации *Water Science and Technology: Water Supply*. 2015, vol. 15, no. 6, pp. 1320-1325. doi: 10.2166/ws.2015.079.
15. Harlamova T.A., Atamanova Yu.Yu. Regularities of reducing the concentration of phenol, cyanides and thiocyanates by combined electrochemical method from chloride-sulfate and ammonia solutions. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2021, vol. 29, no. 1, pp. 38-46. doi: 10.47188/0869-5326_2021_29_1_38.
16. Shi L., Hu Z., Wang Y., Bei E., Lens P.N., Thomas O., Zhan X. In situ electrochemical oxidation in electrodialysis for antibiotics removal during nutrient recovery from pig manure digestate. *Chemical Engineering Journal*. 2021, vol. 413, pp. 127485. doi: 10.1016/j.cej.2020.127485.
17. Kruszelnicka I., Ginter-Kramarczyk D., Wyrwas B., Idkowiak J. Evaluation of surfactant removal efficiency in selected domestic wastewater treatment plants in Poland. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2019, vol. 17, no. 2, pp. 1257-1264. doi: 10.1007/s40201-019-00387-6.
18. Dereszewska A., Cytawa S., Tomczak-Wandzel R., Medrzycka K. The Effect of Anionic Surfactant Concentration on Activated Sludge Condition and Phosphate Release in Biological Treatment Plant. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2015, vol. 24, no. 1, pp. 83-91. doi: 10.15244/pjoes/28640.
19. Stasinakis A.S. Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment—a mini review. *Global NEST journal*. 2008, vol. 10, no. 3, pp. 376-385.
20. Costa E.P., Roccamante M., Amorim C.C., Oller I., Perez J.A.S., Malato S. New trend on open solar photoreactors to treat micropollutants by photo-Fenton at circumneutral pH: Increasing optical pathway. *Chemical Engineering Journal*. 2020, vol. 385, pp. 123982. doi: 10.1016/j.cej.2019.123982.
21. Malvestiti J.A., Dantas R.F. Influence of industrial contamination in municipal secondary effluent disinfection by UV/H₂O₂. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019, vol. 26, no. 13, pp. 13286-13298. doi: 10.1007/s11356-019-04705-1.
22. Stanford C., Jiang J.Q., Alsheyab M. Electrochemical production of ferrate (iron VI): application to the wastewater treatment on a laboratory scale and comparison with iron (III) coagulant. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2010, vol. 209, no. 1, pp. 483-488. doi: 10.1007/s11270-009-0216-4.
23. Kireev S.Y. Intensification of processes of electrodeposition of metals by use of various modes of pulse electrolysis. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017, vol. 8, no. 2, pp. 203-210. doi: 10.1134/S2075113317020095.
24. Shtepa V.N., Zaec N.A., Alekseevskij D.G. Ispol'zovanie ehlektroliznykh protsessov v bezreagentnojvodoochistke:udalenieserovodoroda, organicheskogo zheleza, sinteticheskikh poverkhnostno-aktivnykh veshhestv [The use

с электролизной обработкой // Проблемы региональной энергетики. 2022. № 2(54). С. 101-113. DOI 10.52254/1857-0070.2022.2-54.09.

26. Штепа В.Н., Заец Н.А., Алексеевский Д.Г. Адаптивные решения интеллектуального управления очистными сооружениями // Новые методы и технологии в водоснабжении и водоотведении : сборник трудов / Институт жилищно-коммунального хозяйства ПАП Беларуси; под общ. ред. В.О. Китикова. - Минск : БГТУ, 2022. - С. 281-287.

of electrolysis processes in reagent-free water treatment: removal of hydrogen sulfur, organic iron, synthetic surface-active substances]. *Energetika i avtomatika : naukovij zhurnal*. 2021, no 2. pp. 52-68. doi: 10.31548/energiya2021.02.052.

25. Chernysh E.Y., Shtepa V.N., Plyatsuk L.D., Chubur V.S., Danilov D.V. Anaerobnoesbrazhivanie ptich'ego pometa s inokulyatom aktivnogo ila v kombinatsii s ehlektroliznoj obrabotkoj [Anaerobic fermentation of bird droppings with activated sludge inoculum in combination with electrolysis treatment]. *Problemy regional'noj energetiki*. 2022, vol. 54, no. 2, pp. 101-113. doi: 10.52254/1857-0070.2022.2-54.09.

26. Shtepa V.N., Zaets N.A., Alekseevskij D.G. Adaptivnye resheniya intellektual'nogo upravleniya ochistnymi sooruzheniyami [Adaptive solutions for intelligent management of wastewater treatment plants]. *Novye metody i tekhnologii v vodosnabzhenii i vodoотвоedeinii : sbornik trudov*; Minsk, 2022, pp. 281-287.

Сведения об авторах

Штепа Владимир Николаевич – д.т.н., доцент, проректор по научной работе Полесского государственного университета, e-mail: tppoless@gmail.com

Киреев Сергей Юрьевич – д.т.н., профессор, декан факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта Пензенского государственного университета, e-mail: dean_fptet@pnzgu.ru (автор, ответственный за переписку)

Козырь Алексей Викторович – аспирант Полесского государственного университета, e-mail: tppoless@gmail.com

Шикунец Алексей Борисович – магистрант Полесского государственного университета, e-mail: tppoless@gmail.com

Наумов Лев Васильевич – к.т.н., доцент кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Пензенского государственного университета, e-mail: lvn-25@yandex.ru

Киреева Светлана Николаевна – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Химия» Пензенского государственного университета, e-mail: svetlana58_75@mail.ru

Information about authors

Shtepa Vladimir Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-rector for Scientific Work of Polesky State University, e-mail: tppoless@gmail.com

Sergey Yurievich Kireev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Industrial Technologies, Electric Power Engineering and Transport of Penza State University, e-mail: dean_fptet@pnzgu.ru (the author responsible for the correspondence)

Alexey Viktorovich Kozyr – postgraduate student of Polesky State University, e-mail: tppoless@gmail.com

Alexey Borisovich Shikunets – Master's student of Polesky State University, e-mail: tppoless@gmail.com

Naumov Lev Vasilyevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Technologies and Equipment of Mechanical Engineering" of Penza State University, e-mail: lvn-25@yandex.ru

Kireeva Svetlana Nikolaevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry of Penza State University, e-mail: svetlana58_75@mail.ru

Для цитирования

В. Н. Штепа, С. Ю. Киреев, А. В. Козырь, А. Б. Шикунец, Л. В. Наумов, С. Н. Киреева. Оценка эффективности параметров безреагентной электролизной очистки сточных вод от азотсодержащих соединений // Гальванотехника и обработка поверхности. 2022. Т. 30, № 4. С. 52-60.

DOI: 10.47188/0869-5326_2022_30_4_52

For citation

V.N.Shtepa, S. Yu. Kireev, A.V.Kozyr, A. B.Shikunets, L. V. Naumov, S. N. Kireeva. Electrochemical Evaluation of the effectiveness of the parameters of reagent-free electrolysis wastewater treatment from nitrogen-containing compound. *Galvanotekhnika I obrabotka poverkhnosti*. 2022, vol. 30, no. 4, pp. 52-60.

DOI: 10.47188/0869-5326_2021_30_4_52

ГАЛЬВАНОТЕХНИКА И ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ

Официальный сайт журнала

www.galvanotekhnika.info

Содержание журналов за 2022 год



2022 год №4

<p>Электроосаждение металлов и сплавов Electroplating of metals and alloys</p>	<p>Подбор мономера для создания проводящих покрытий на основе ряда замещенных тетрафенилпорфиринов <i>А.Н. Киселёв, Г.И. Матвиенко, М.В. Тесакова, С.А. Сырбу, В.И. Парфенюк</i> DOI: 10.47188/0869-5326_2022_30_4_4 Ключевые слова: <i>порфирины, полипорфириновые покрытия, окислительно-восстановительные свойства, электрополимеризация, электропроводящие свойства</i></p> <p>Электроосаждение нанопокровтий с участием металлов триады железа <i>Л.А. Фишгойт, И.И. Федораев, А.В. Князев, Ф.В. Касьянов, Е.А. Перковский</i> DOI: 10.47188/0869-5326_2022_30_4_13 Ключевые слова: <i>электроосаждение, гальванические покрытия, сплавы на основе металлов триады железа, металлоиды, магнитные свойства, коррозионные свойства, каталитические свойства</i></p>
<p>Альтернативные способы нанесения покрытий Alternative treatments</p>	<p>Формирование функциональных металлооксидных покрытий пиролизом карбоксилатов металлов <i>С.В. Стаханова, Н.В. Свириденкова, Е.И. Тимчишина, А.А. Постников, А.Ф. Жуков</i> DOI: 10.47188/0869-5326_2022_30_4_29 Ключевые слова: <i>оксидные покрытия, функциональные покрытия, металлооксидные пленки, метод CSD, электродный материал, суперконденсатор</i></p>
<p>Экология и ресурсосбережение Environment and Resources Saving</p>	<p>Оценка эффективности параметров безреагентной электролизной очистки сточных вод от азотсодержащих соединений <i>В.Н. Штепа, С.Ю. Киреев, А.В. Козырь, А.Б. Шикунец, Л.В. Наумов, С.Н. Киреева</i> DOI: 10.47188/0869-5326_2022_30_4_48 Ключевые слова: <i>стационарный электролиз, нестационарный электролиз, безреагентные технологии, аквапоника, очистка воды, азотсодержащие соединения</i></p>