

17. *Stinghen A.E.M., Massy Z.A., Vlassara H., Striker G.E., Boullier A.* Uremic Toxicity of Advanced Glycation End Products in CKD // *Journal of the American Society of Nephrology: JASN.* 2016. Vol. 27. № 2. PP. 354-370.
18. *Jiang J., Zhang Y., Chen J. et al.* Serum and Tissue Levels of Advanced Glycation End Products and Risk of Mortality in Patients on Maintenance Hemodialysis // *American Journal of Nephrology.* 2021. Vol. 52. № 1. PP. 8-16.
19. *Kuznetsov A. et al.* Multimode monitoring of AGE excretion in hemodialysis // *Nephrology Dialysis Transplantation.* 2016. Vol. 1. Suppl. 1. PP. 1500-1501.
20. *Fridolin I., Karai D., Kostin S., Ubar R.* Accurate Dialysis Dose Evaluation and Extrapolation Algorithms During Online Optical Dialysis Monitoring // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering.* 2012. Vol. 60. № 5. PP. 1371-1377.
21. *Uhlir F., Fridolin I., Magnusson M., Lindberg L.-G.* Dialysis dose (Kt/V) and clearance variation sensitivity using measurement of ultraviolet-absorbance (on-line), blood urea, dialysate urea and ionic dialysance // *Nephrology Dialysis Transplantation.* 2006. Vol. 21. № 8. PP. 2225-2231.
22. *Schneditz D., Fariyike B., Osheroff R., Levin N.W.* Is intercompartmental urea clearance during hemodialysis a perfusion term? A comparison of two pool urea kinetic models // *Journal of the American Society of Nephrology: JASN.* 1995. Vol. 6. № 5. PP. 1360-1370.
23. *Burgelman M., Vanholder R., Fostier H., Ringoir S.* Estimation of parameters in a two-pool urea kinetic model for hemodialysis // *Medical Engineering & Physics.* 1997. Vol. 19. № 1. PP. 69-76.
24. *Vasilevsky A.M., Konoplev G.A., Stepanova O.S., Zemchenkov A.Y., Gerasimchuk R.P., Frorip A.* Dual-wavelength method and optoelectronic sensor for online monitoring of the efficiency of dialysis treatment // *Journal of Physics: Conference Series.* 2015. Vol. 643.
25. *Kuznetsov A., Frorip A., Maiste A., Ots-Rosenberg M., Sünter A., Sablonin J., Vasil'chenko J.* Advanced glycation end products in hemodialysates as fluorescent and optical

absorption markers of patients mortality / Eighth International Conference on Advanced Optical Materials and Devices (AOMD-8). 2014. Vol. 9421.

*Геннадий Александрович Земченков,*  
*врач-нефролог,*  
*Обособленное подразделение № 1,*  
*ООО «Б.Браун Авитум Руссланд Клиникс»,*  
*Георгий Асадович Коноплев,*  
*канд. техн. наук, доцент,*  
*кафедра фотоники,*  
*ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский*  
*государственный электротехнический университет*  
*«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),*  
*г. С.-Петербург,*  
*Вадим Корсаков,*  
*директор,*  
*«Jeko Design OÜ»,*  
*Артур Иванович Кузнецов,*  
*д-р физ.-мат. наук, ст. менеджер по инновациям,*  
*«AS Ldiamo»,*  
*г. Тарту, Эстония,*  
*Наталья Владимировна Рощина,*  
*аспирант,*  
*Оксана Сергеевна Степанова,*  
*канд. техн. наук, доцент,*  
*кафедра фотоники,*  
*ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский*  
*государственный электротехнический университет*  
*«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),*  
*г. С.-Петербург,*  
*Александр Фрорип,*  
*Ph.D., технический директор,*  
*«AS Ldiamo»,*  
*г. Тарту, Эстония,*  
*e-mail: oksana\_lopatenko@mail.ru*

**Н.А. Базаев, А.В. Бакланова, Б.М. Путря**

## **Фотокаталитический метод элиминации мочевины**

### **Аннотация**

Рассмотрены различные подходы к реализации фотокаталитического метода элиминации мочевины в водных растворах. Приведены основные преимущества и недостатки фотокаталитического метода в сравнении с существующими методами регенерации диализата. Описаны возможности применения фотокаталитического метода элиминации мочевины в носимых аппаратах искусственного очищения крови.

### **Общие подходы к элиминации мочевины**

Эффективное удаление мочевины из водных растворов является актуальной задачей в медицине искусственного очищения крови и в промышленной очистке сточных вод [1]. С решением данной задачи связан ряд технологических трудностей, таких как низкая эффективность применения сорбентов [2], электрорзатратность термических и электрохимических подходов разложения мочевины, возможное образование токсичных продуктов разложения мочевины при реализации ферментативного и фотокаталитического методов и пр. В *табл. 1* приведены достоинства и недостатки наиболее часто используемых методов элиминации мочевины. Из *таблицы* видно, что обеспечение адекватной скорости элиминации мочевины, а также стабилизация биохимического состава раствора являются наиболее трудными моментами в случае регенерации диализирующего раствора. При реализации ферментативно-

го метода интенсивное образование ионов аммония, а также дестабилизация ионного состава и водородного показателя раствора являются главными проблемами. Электрохимический метод, в зависимости от материала рабочих электродов, исходного состава диализирующей среды и режима работы электрохимической ячейки, также воздействует на состав диализата (образование гипохлорит-иона, влияние на водородный показатель раствора, влияние на концентрацию кальция, магния, хлора, осмотического агента и пр).

Потенциальным решением перечисленных технических трудностей могло бы стать комбинирование различных физико-химических методов регенерации отработанного раствора, позволяющее создать систему регенерации диализата, которая смогла бы удалять из диализата продукты жизнедеятельности организма пациента и избыток жидкости, не меняя при этом исходный состав и кислотно-основное состояние раствора.

Таким образом, разработка энергосберегающего, эффективного и в то же время безопасного метода элиминации мочевины создала бы альтернативу существующим методам регенерации отработанных водных растворов. Одним из таких подходов является воздействие на водные растворы ультрафиолетовым излучением, которое обеспечивает как разложение органических продуктов метаболизма, так и загрязнителей различного происхождения. Кроме того, ультрафиолетовое излучение позволяет производить обеззараживание водных растворов. Таким образом, данный метод может потенциально найти применение в модулях регенерации отработанного диализирующего раствора, системах водоподготовки для медицинских диализных аппаратов, системах водоочистки в промышленности и т. д.

Начиная с 2000-х годов [8], [9] в мире проводят исследование фотокаталитического и ультрафиолетового методов разложения мочевины в контексте их возможного применения в энергетике [10], [11], медицине [7], экологии [12], [13] и т. д. Также ультрафиолетовый метод может найти применение в системах водоподготовки для технических и бытовых нужд. Особенно актуальным этот метод становится в свете проблем, связанных с окружающей средой [14], в частности при очистке вод, загрязненных азотсодержащими удобрениями [15], [16], продуктами производства фармацевтических средств, косметики, пластиковых изделий и т. д. [17]. Рост концентрации мочевины и азотсодержащих соединений в воде приводит к эвтрофикации водоемов [18]. В то же время мочевина является одним из основных продуктов метаболизма в человеческом организме. В контексте заместительной почечной терапии и разработки носимых аппаратов искусственного очищения крови элиминация мочевины является одной из основных проблем и технологически трудоемкой задачей, поскольку у взрослого человека мочевина вырабатывается со скоростью 20...40 г/сут.

В контексте вышесказанного, фотокаталитический метод может использоваться в качестве подходящей альтернативы существующим методам регенерации диализата, поскольку УФ-излучение может применяться как для элиминации мочевины, так и для обеззараживания и очистки воды и воздуха, в частности в медицинских целях. К преимуществам данного метода можно отнести безопасность процесса, обеззараживание жидкости и воздействие на такие органические метаболиты, как мочевина. Предполагается, что данный метод является более эргономичным, надежным и экономичным по сравнению с остальными методами регенерации диализата.

В связи с этим ультрафиолетовый метод может рассматриваться как одна из возможных альтернатив вышперечисленным методам регенерации диализата. Ниже будет представлен обзор технических подходов удаления мочевины ультрафиолетовым методом.

### Фотокаталитический метод разложения мочевины

Принцип фотокаталитического метода заключается в том, что мочевина, адсорбируясь на поверхности каталитически активного материала, разлагается в присутствии УФ-излуче-

ния. Из литературы следует, что одним из основных и наиболее распространенных каталитических материалов для разложения мочевины является оксид титана  $TiO_2$  и его различные модификации. Эффективность фотокаталитического метода по мочеvine зависит от таких факторов, как материал, на поверхности которого осуществляется процесс разложения мочевины, водородный показатель раствора и его исходный состав, наличие дополнительных катализаторов в составе раствора (таких как персульфат натрия), источник УФ-излучения и режим его работы и пр.

В статье [19] авторы оценивают эффективность удаления мочевины в системе производства сверхчистой воды (СВ). В статье было изучено влияние ультрафиолетового излучения с длиной волны 185 нм в непрерывно работающей колонке на скорость элиминации мочевины. Авторы предположили, что мочевина разлагалась в фотокаталитической ячейке до  $CO_2$  и  $NO_3$  под действием радикалов ОН, которые образовывались при диссоциации молекул воды в присутствии ультрафиолетового (УФ) излучения, хотя путь окисления мочевины не был полностью изучен в данной работе. Авторы исследования выбрали персульфат натрия ( $Na_2S_2O_8$ ) в качестве дополнительного окислителя для повышения скорости элиминации мочевины при УФ-облучении. Персульфат считается эффективным окислителем, производящим сульфатные радикалы с высоким окислительно-восстановительным потенциалом (2,5 В). При добавлении персульфата в раствор удаление мочевины увеличивалось в сравнении с предыдущим экспериментом, а именно: эффективность элиминации мочевины росла пропорционально количеству добавленного персульфата, увеличиваясь в 25 раз при концентрации персульфата 20 ммоль/л по сравнению с полным отсутствием персульфата в растворе. Таким образом, был сделан вывод, что комбинация персульфата и УФ-облучения позволяет непрерывно удалять мочевину из раствора и что персульфатный радикал играет важную роль в разложении мочевины.

В статье [20] рассмотрены технологии удаления мочевины из воды плавательных бассейнов. В данном исследовании сравнивались характеристики семи УФ-технологий удаления мочевины, включая УФ-излучение и вакуумное ультрафиолетовое (ВУФ) излучение, а также их сочетание с перекисью водорода (ВУФ/ $H_2O_2$  и УФ/ $H_2O_2$ ), сульфитом натрия (УФ/ $Na_2SO_3$ ), персульфатом калия (ВУФ/ $K_2S_2O_8$  и УФ/ $K_2S_2O_8$ ). Образцы воды для исследования данных методов собирались из бассейна в период с 3 до 4 часов дня. Химический состав воды исследовали непосредственно после взятия образцов. Концентрация мочевины во всех образцах была доведена до значения 5 мг/л, а объем проб составил 400 мл. В испытаниях использовалась ртутная лампа низкого давления (создающая излучение на длинах волн 185 нм для ВУФ-метода и 254 нм для УФ-метода), которую помещали в центр стерилизующего цилиндра, где проводили фотолиз мочевины. Интенсивность излучения на длине волны 185 нм составила  $0,32 \pm 0,1$  мВт/см<sup>2</sup>, а на длине волны 254 нм –  $14,3 \pm 0,6$  мВт/см<sup>2</sup>. На рис. 1 представлено сравнение основанных на УФ-излучении подходов удаления мочевины из воды в бассейне.

Таблица 1

Сравнение методов регенерации диализата

Метод регенерации	Достоинства	Недостатки
Сорбционный метод [3]	Хорошая сорбционная емкость по креатинину и мочевой кислоте	Низкая сорбционная емкость по мочеvine, изменение pH диализата и его ионного состава
Электролиз [4], [5]	Высокая скорость удаления мочевины за счет электрохимического окисления на аноде	Использование платины, изменение pH диализата и его ионного состава, затраты электроэнергии, во время электролиза образуются побочные продукты реакции (например, гипохлорит натрия, нитраты, нитриты)
Ферментативный метод [6]	Ферменты, такие как уреазы, увеличивают скорость удаления мочевины	Дороговизна картриджа с уреазой, изменение pH диализата и его ионного состава, время работы сорбента – 6...8 ч, образование аммиака во время гидролиза мочевины
УФ-метод [7]	Разложение низкомолекулярных соединений, дополнительная стерилизация диализата	Низкая скорость разложения мочевины, сложность организации сменного элемента в аппарате

Как видно из графиков, снижение концентрации мочевины с применением УФ-метода на длине волны 254 нм без добавления дополнительных катализаторов за 3 ч испытаний составляет не более 0,7 %. Для сравнения, ВУФ-метод за то же время и при тех же условиях снижает концентрацию мочевины на 60 %. Добавление  $K_2S_2O_8$  в пробу в количестве 0,1 ммоль позволяет достичь снижения концентрации мочевины на 71,7 % для УФ-метода, в то время как для ВУФ-метода при добавлении в пробу того же соединения в том же количестве мочевины была удалена из раствора почти полностью. По сравнению с процессами, основанными на УФ-излучении, ВУФ-методы оказались более надежными и эффективными.

Технология, описанная в [21], направлена на удаление мочевины из отработанного диализата посредством фотохимического окисления. Система регенерации жидкости для диализа включает в себя: наноструктурный анод, источник света, настроенный на освещение анода, и катод, пропускающий кислород. Наноструктуры представляют собой нанопроволоку из  $TiO_2$ , которая выращивается гидротермически. Источником света служит набор светодиодов (длина волны 365 нм, интенсивность излучения – 4 мВт/см<sup>2</sup>). Кислородопроницаемый или воздухопроницаемый катод представляет собой ткань с платиновым покрытием. Описываемая система включает в себя ячейку окисления мочевины и установку для селективного удаления токсинов. В процессе работы модуля регенерации диализата отработанный диализат, содержащий мочевины, протекает через ячейку с двумя электродами, разделенными диэлектрической прокладкой, и подвергается обработке УФ-излучением, способствующей разложению мочевины до  $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $N_2$ . В патенте было установлено, что диоксид титана  $TiO_2$  является оптимальным материалом для разложения мочевины. Описанный в патенте модуль регенерации диализата был испытан на водном растворе мочевины (концентрация – 10 ммоль/л) и хлорида натрия (концентрация – 0,15 ммоль/л). Плотность фототока во время эксперимента составила 1 мА/см<sup>2</sup>, в то время как площадь анодной поверхности была 1600 см<sup>2</sup>. В результате испытаний было установлено, что удельная скорость элиминации мочевины составила 2,66 мкг/(см<sup>2</sup>·ч).

В статье [22] также была продемонстрирована возможность фотоэлектрохимического окисления мочевины с применением  $TiO_2$  в системах регенерации диализата для портативных аппаратов искусственного очищения крови. Исследование показало повышение эффективности элиминации мочевины за счет высокой фотоэлектронной селективности  $TiO_2$  к разложению данного метаболита (97 %). Было установлено, что эта система позволяет разлагать мочевины при низких концентрациях

(до 10 ммоль/л). При фототоке плотностью 0,8 мА/см<sup>2</sup> мочевины разлагается со скоростью 2,66 мкг/(см<sup>2</sup>·ч).

Главным достоинством предложенной технологии являются экологическая безопасность и бактерицидный эффект  $TiO_2$  по отношению к различным патогенным микроорганизмам и органическим соединениям. Преимущества данного подхода дают предпосылки к развитию технологии фотокаталитической очистки водных растворов в медицинских системах, так как он позволяет одновременно проводить регенерацию и дезинфекцию отработанного раствора [23].

В исследовании [24] предлагается применение комбинированных электрохимических, фотохимических и ультразвуковых процессов, способствующих деградации цитарабина (химиотерапевтического препарата), креатинина и мочевины в искусственной моче. Электрохимическая ячейка непрерывного действия с фильтром-прессом состоит из анода и  $Ti$ -сетки, используемой в качестве катода. Система была смонтирована с расстоянием между электродами 4,36 мм. Для закачки раствора через ячейку использовался перистальтический насос, а источник ультрафиолетового излучения (375 Вт) облучался непосредственно в ячейку.

В работе [25] описан фотокатализатор  $F-TiO_2/Pd$  для разложения и минерализации мочевины. Поверхностный  $Pd$  и фторид на  $F-TiO_2/Pd$  действуют синергически для увеличения интенсивности образования  $OH$ , который является первичным окислителем при фотокаталитической деградации мочевины. Среди восьми фотокатализаторов, оцененных в данном исследовании (т. е. голые  $TiO_2$ ,  $Pd/TiO_2$ ,  $F-TiO_2$ ,  $F-TiO_2/Pd$ ,  $Au/TiO_2$ ,  $F-TiO_2/Au$ ,  $Pt/TiO_2$  и  $F-TiO_2/Pt$ ),  $F-TiO_2/Pd$  проявляет самую высокую активность при деградации мочевины. Кроме того, фотокаталитическая активность  $F-TiO_2/Pd$  сохранялась в повторяющихся циклах разложения мочевины. Скорость разложения мочевины снижалась при росте водородного показателя раствора. Так, константа разложения мочевины для материала  $F-TiO_2/Pd$  составила 0,38 при  $pH = 3$ , в то время как увеличение  $pH$  до значения 10 снизило константу разложения мочевины до 0,2.

## Выводы

Фотокаталитический метод позволяет при определенных условиях достигать высокой скорости элиминации мочевины. Так, в статье [0] удельная скорость элиминации мочевины на оксиде составила 2,66 мкг/(см<sup>2</sup>·ч) при плотности фототока 0,8 мА/см<sup>2</sup>. Для сравнения, удельная скорость разложения мочевины электрохимическим методом может варьироваться от 0,5 до 2 мкг/(см<sup>2</sup>·ч) в зависимости от используемого материала рабочего электрода и выбранного режима работы электрохи-

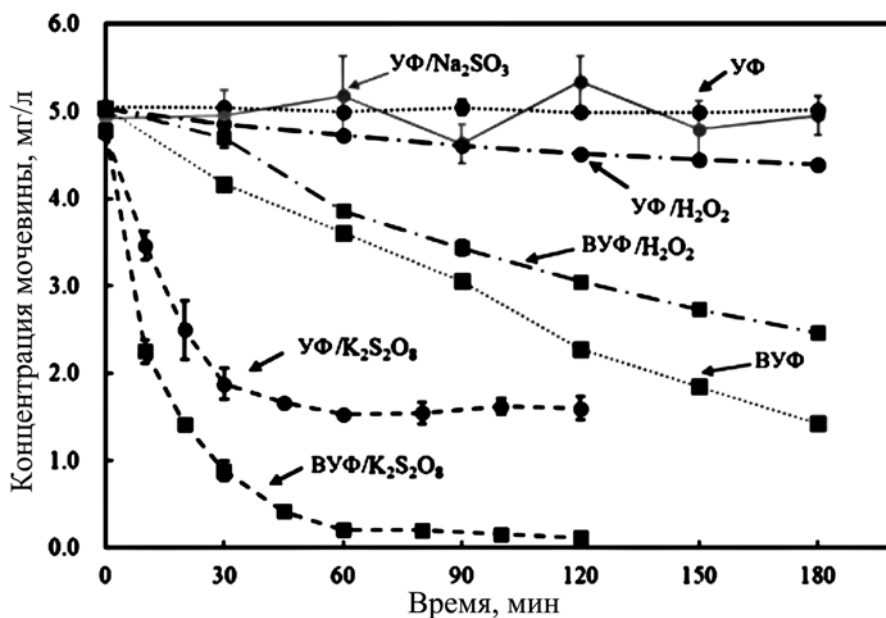


Рис. 1. Сравнение различных подходов к удалению мочевины из водного раствора фотокаталитическим методом [20]

мической ячейки [5], [26]. Несмотря на то, что прямой фотокалитический метод уступает электрохимическому в скорости элиминации мочевины, он дополнительно позволяет осуществлять обеззараживание раствора, а также не сопряжен с образованием таких токсичных продуктов реакции, как гипохлорит-ион и хлорсодержащие соединения. Также фотокалитический метод при использовании таких катализаторов, как  $K_2S_2O_8$ , позволяет обеспечить непрерывную элиминацию мочевины из раствора. Однако использование каталитических соединений может быть ограничено при создании носимой аппаратуры очищения крови. Использование технологии вакуумной ультрафиолетовой обработки позволяет значительно повысить скорость элиминации мочевины, однако применение данной технологии затруднительно в случае разработки носимой аппаратуры искусственного очищения крови.

Таким образом, фотокалитический метод разложения мочевины в водных растворах может найти применение при разработке медицинских систем искусственного очищения крови (особенно в системах с рециркуляцией растворов для перитонеального диализа) благодаря возможности обеззараживания раствора и удаления не только мочевины, но и других низкомолекулярных органических соединений. Данный метод может найти свое применение в комбинации с сорбционным и ферментативным методами регенерации диализата при разработке носимого аппарата «искусственная почка».

#### Список литературы:

- Gura V., Rivara M.B., Bieber S., Munshi R., Smith N.C., Linke L., Kundzins J., Beizai M., Ezon C., Kessler L., Himmelfarb J. A wearable artificial kidney for patients with end-stage renal disease // JCI Insight. 2016. Vol. 1. № 8. PP. 1-15.
- Agar J.J.W. Review Understanding sorbent dialysis systems // Nephrology. 2010. Vol.15. № 4. PP. 406-411.
- Tsakamoto T. Dialysate Regeneration System for Portable Dialysis / US Patent № 11/020,841. 2003.
- Keller R.W., Yao S.J., Brown J.M., Wolfson S.K., Zeller M.V. Electrochemical Removal of Urea from Physiological Buffer as the Basis for a Regenerative Dialysis System // J.Electroanal. Chem. 1980. Vol. 116. PP. 469-485.
- Wester M., Simonis F., Lachkar N., Wodzig W.K., Meuwissen F.J., Kooman J.P., Boer W.H., Joles J.A., Gerritsen K.G. Removal of urea in wearable dialysis device: A reappraisal of electro-oxidation // Artificial Organs. 2014. Vol. 38. № 12. PP. 998-1006.
- Davenport A., Gura V., Ronco C., Beizai M., Ezon C., Rambod E. A wearable haemodialysis device for patients with end-stage renal failure: A pilot study // Lancet. 2007. Vol. 370. PP. 2005-2010.
- Shao G., Zang Yu., Hinds B.J.  $TiO_2$  Nanowires Based System for Urea Photodecomposition and Dialysate Regeneration // Applied Nano Materials. 2019. Vol. 2. № 10. PP. 6116-6123.
- Pelizzetti E., Calza P., Mariella G., Maurino V., Minero C., Hidaka H. Different photocatalytic fate of amido nitrogen in formamide and urea // Chemical Communications. 2004. Vol. 10. № 13. PP. 1504-1505.
- Calza P., Pelizzetti E., Minero C. The fate of organic nitrogen in photocatalysis: An overview // J. Appl. Electrochem. 2005. Vol. 35. PP. 665-673.
- Okemoto A., Tanakaa K., Kudo Yu., Gohda Sh. Hydrogen production for photocatalytic decomposition of water with urea as a reducing agent // Catalyst Today. 2017. Vol. 307. PP. 1-6.
- Kaneko M., Nemoto J., Ueno H., Gokan N., Ohnuki K., Horikawa M., Saito R., Shibata T. Photoelectrochemical reaction of biomass and bio-related compounds with nanoporous  $TiO_2$  film photoanode and  $O_2$ -reducing cathode // Electrochemistry Communications. 2006. Vol. 8. № 2. PP. 336-340.
- Nicolau E., Fonseca J.J., Rodriguez-Martinez J.A., Richardson J., Flynn M., Griebenow K., Cabrera C.R. Evaluation of a urea bioelectrochemical system for wastewater treatment processes // ACS Sustain Chem. Eng. 2014. Vol. 2. PP. 749-754.

- Park S., Lee J.T., Kim J. Photocatalytic oxidation of urea on  $TiO_2$  in water and urine: Mechanism, product distribution, and effect of surface platinization // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2019. Vol. 2. № 8. PP. 1044-1053.
- Lasek J., Yu Y.H., Jeffrey C.S.Wu. Removal of  $NO_x$  by photocatalytic processes // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. 2013. Vol. 14. PP. 29-52.
- Vaiano V., Sacco O., Capia G.D., Femia N., Sannino D. Use of Visible Light Modulation Techniques in Urea Photocatalytic Degradation // Water. 2019. Vol. 11. PP. 1-14.
- Bremmer J.M. Recent research on problems in use of urea as a nitrogen fertilizer // Fertilizer Research. 1995. Vol. 42. PP. 321-329.
- Park S., Lee J.T., Kim J. Photocatalytic oxidation of urea on  $TiO_2$  in water and urine: Mechanism, products, distribution, and effect of surface platinization. // Environ. Sci. Pollut. Res. 2019. Vol. 26. PP. 1044-1053.
- Glibert P.M., Harrison J., Heil C., Seitzinger S. Escalating worldwide use of urea – A global change contributing to coastal eutrophication // Biogeochemistry. 2006. Vol. 77. PP. 441-463.
- Choi J., Chung J. Evaluation of urea removal by persulfate with UV irradiation in an ultrapure water production system // Water Research. 2019. Vol. 158. PP. 411-416.
- Long L., Bu Y., Chen B., Sadiq R. Removal of urea from swimming pool water by UV/VUV: The roles of additives, mechanisms, influencing factors, and reaction products // Water Research. 2019. Vol. 161. PP. 89-97.
- Hinds B., Shao G. Apparatus and method for urea photo-oxidation / US Patent 10894118 A1. 2020.
- Shao G., Zang Y., Hinds B.J.  $TiO_2$  Nanowires Based System for Urea Photodecomposition and Dialysate Regeneration // ACS Applied Nano Materials. 2019. Vol. 2. № 10. PP. 6116-6123.
- Степанов А.Ю., Сотникова Л.В., Владимиров А.А., Дягилев Д.В., Ларичев Т.А., Пугачев В.М., Титов Ф.В. Синтез и исследование фотокалитических свойств материалов // Вестник КемГУ. 2013. Т. 1. № 2. С. 249-255.
- Antonelli R., Pimenta F.S., Tonhela M.A., Fornazari A.L., Granato A.C., Malpass G.R.P. Degradation of cytarabine, creatinine, and urea in artificial urine by a photo-assisted sono-electrochemical process // Research, Society and Development. 2020. Vol. 9. № 8. PP. 371-377.
- Kim H., Park S., Kim W., Kim S., Kim J. Titanium dioxide surface modified with both palladium and fluoride as an efficient photocatalyst for the degradation of urea // Separation and Purification Technology. 2018. Vol. 209. № 8. PP. 580-587.
- Grinval'd V.M., Leshchinskii G.M., Rodin V.V., Strelkov S.I. Development and testing of a unit for electrochemical oxidation of products of hemodialysis // Biomed. Engineering. 2003. Vol. 37. № 2. PP. 67-72.

Николай Александрович Базаев,  
д-р техн. наук, доцент, профессор,  
Институт биомедицинских систем,  
Анастасия Валерьевна Бакланова,  
инженер,  
научно-исследовательская лаборатория  
систем искусственной биомедицинской регуляции,  
Борис Михайлович Путря,  
канд. техн. наук, ведущий инженер,  
Институт биомедицинских систем,  
ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет «Московский  
институт электронной техники»,  
г. Москва, г. Зеленоград,  
e-mail: putryabm@gmail.com