



www.volsu.ru

# ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

---

---

DOI: <https://doi.org/10.15688/jvolsu11.2017.2.2>

UDC 628.3

LBC 38.761.2

## APPLICATION OF AVALANCHE-STREAMER DISCHARGE FOR SEWAGE WATER TREATMENT

**Leonid M. Makalskiy**

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation

**Olga M. Tsekhanovich**

Gzhel State University, Elektroizolyator Town, Moscow Region, Russian Federation

**Abstract.** Anthropogenous activity leads to environment pollution, to emergence of organic and inorganic substances, as well as harmful microorganisms in sewage waters. The authors study the influence of the reagent-free physical and chemical method of impact on the polluted waters with the application of avalanche-streamer discharges. It is shown that their application allows to effectively and cheaply carry out decomposition of organic and inorganic substances by decomposing them to filtered components, by having impact on heavy metals with formation of the insoluble bases and oxides. The conducted research show the possibility of universal treatment of water through using electrodischarge technologies.

**Key words:** avalanche-streamer discharges, technology of sewage water treatment, destruction of organic and inorganic pollution, extracting the ions of heavy metals from water solutions, energy efficient technologies of water treatment.

УДК 628.3

ББК 38.761.2

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАВИНОСТРИМЕРНОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

**Леонид Михайлович Макальский**

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,  
г. Москва, Российская Федерация

**Ольга Михайловна Цеханович**

Гжельский государственный университет, пос. Электроизолитор, Московская область,  
Российская Федерация

**Аннотация.** Антропогенная деятельность приводит к загрязнению в окружающей среде, появлению в сточных водах органических и неорганических веществ, вредных микроорганизмов. В работе исследовано влияние безреагентного физико-химического метода воздействия на загрязненные воды с применением лавиностримерных разрядов. Показано, что применение лавиностримерных разрядов позволяет эффективно и

с малыми затратами энергии осуществить разложение органических и неорганических включений с разложением их на отфильтровываемые компоненты, воздействием на тяжелые металлы с образованием нерастворимых оснований и окислов. Проведенные исследования показывают возможность универсальной очистки воды при использовании электроразрядных технологий.

**Ключевые слова:** лавиностримерные разряды, технология очистки сточных вод, деструкция органических и неорганических загрязнений, обеспечение вывода из водных растворов ионов тяжелых металлов, энергоэффективные технологии очистки воды.

Среди загрязняющих природные воды веществ на одном из первых мест стоят такие вещества как органика, тяжелые металлы, вредные микроорганизмы. К наиболее распространенным методам очистки воды от загрязнителей относят выпаривание, применение химических реагентов и в последнее время электроразрядные технологии. Когда концентрация вредных веществ невысока, для доочистки сточных вод от вредных для живых организмов прибегают к биологическому или химическому окислению. Применяется и физико-химическая очистка вод путем воздействия на загрязненные воды импульсными электрическими тлеющими разрядами. В известных технологиях в раствор необходимо добавление перекиси водорода, каталитических элементов [1; 3; 5; 6; 12]. Применение разрядов непосредственно в воде приводит к высокому энергопотреблению, а при использовании полых высоковольтных электродов требуется аппаратура нагнетания воздуха [7]. При использовании электроразрядных технологий эффект очистки достигается без использования химических реагентов. В результате импульсной обработки воды достигают полного разложения органических веществ до элементарных безопасных веществ – углерода (С), окислов углерода (СО, СО<sub>2</sub>) или компонентов в виде гелей и коагулирующих нерастворимых веществ в воде [9].

Предлагаемая технология обработки воды позволила проконтролировать состояние и количество загрязненного вещества от числа воздействующих импульсов обработки воды. Авторы [11] показали, что независимо от концентрации такого органического вещества как фенол (0,07 мас. %, 0,7 мас. %, 7,0 мас. %) продолжительность импульса должна соответствовать от 5 до 10 мкс, наиболее оптимально при работе установки напряжение на электродах 25–30 кВ. Работа [11] позволила выявить влияние таких физических

параметров как параметры воздействующих импульсов, а также общую энергию (дозу) воздействия на получаемые соединения в растворе. Этот подход может быть использован для анализа при других методах электрофизического воздействия на вредные компоненты в растворах и оказалось возможным использовать качественный анализ получаемых соединений после воздействия разрядов.

Использование лавиностримерного разряда предполагает разложение различных химических соединений под действием ионизирующих излучений таких, как «бомбардировка» поверхности воды ионами и электронами. При таком радиолизе могут образовываться как свободные радикалы, так и отдельные нейтральные молекулы. Радиолиз в лавиностримерном разряде дополняется фотолизом, который также приводит к разрушению менее прочных химических связей, например, для известного случая фоторазложения бинарных молекул хлора под действием ультрафиолета, полимеризации при засветке. Условием распада молекулы (молекул) паров воды в разряде при ионизации молекул в межэлектродном пространстве, при воздействии бэта и СВЧ излучений, протекают реакции с образованием гидроксильных радикалов ОН<sup>•</sup>, что способствует появлению в растворе воды пероксида водорода Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub>. В результате появления избыточных гидроксильных радикалов и перекиси водорода в результате «бомбардировки» поверхности воды ионами и лавинами электронов в лавиностримерных разрядах, возможно нарушение устойчивых состояний высокомолекулярных соединений и появление окислительных химических реакций. Поэтому возможна инициация самих реакций и каталитических процессов реакций с загрязняющими компонентами в воде, которые в исходных условиях были бы невозможны. Это открывает прикладное значение очистки воды наравне с известными радио-биологическими

процессами в радиобиологии, в этом случае энергия квантов излучения слишком мала для разложения воды, но очистка воды от вредных компонентов может быть перспективной в связи с относительной легкостью реализации облучения воды при использовании лавиностримерного разряда.

Наряду с этим установлено, что импульсный радиолит инициирует только быстрые реакции, проходящие быстрее, чем за 100 микросекунд. Поэтому этот метод используется в только исследовательских целях, когда смешивание реагентов и инициация реакций происходят слишком быстро, это аналогично использованию фотолитиза с инициацией электролиза эксимерного лазера [4].

Использование импульсного барьерного разряда в газе над поверхностью воды с длительностью импульсов 50–300 нс также эффективно для генерации радикалов  $\text{OH}^\cdot$  в воздухе, содержащем пары воды. В этом случае, концентрация радикалов  $\text{OH}^\cdot$  в зоне разряда может превышать концентрацию молекул озона и достигает величин  $10^{14}$ – $10^{15}$  см<sup>-3</sup> и показано, что максимальная концентрация радикалов появляется через 30–50 мкс после окончания импульса напряжения. При времени жизни радикалов  $\text{OH}^\cdot$  в воздухе в несколько сотен микросекунд, реализуется перевод радикалов из газовой фазы в воду с последующим воздействием на растворенные в воде загрязнения. Импульсный барьерный разряд использовался при воздействии на капли диспергированной загрязненной воды. В этом случае импульсный барьерный разряд проходил сквозь водовоздушный поток. При этом после осаждения капель воды после прохождения зоны барьерного разряда, ее фильтрации или отстаивания, удаляются ионы минеральных соединений (ионы железа, марганца) и органические вещества (фенол и трихлорэтилен) [10; 15; 16; 21].

Очистка воды реализовывалась как и при лавиностримерных разрядах при формировании высоковольтных слаботочных разрядов непосредственно над поверхностью воды. Они вызывали ионизационные процессы в газовой среде, приводили к возбуждению молекул газа с появлением излучения, продвижению электронов и ионов. Объемные заряды создавали сильные электрические поля и

«бомбардировку» поверхности воды ионами и электронами (так как поверхность является заземленным электродом). Эти процессы реализовывались в виде тлеющих разрядов при пониженных давлениях в межэлектродном пространстве. Создание пониженного давления при реализации тлеющего разряда влияет на общие затраты энергии очистки воды за счет применения вакуумной техники.

Реализовать разрядные явления при нормальном давлении с перечисленными воздействующими факторами удалось при создании в разрядном промежутке лавиностримерных разрядов. Разряды при нормальном давлении воздуха над поверхностью воды в большей степени увеличивают воздействие сильных электрических полей с объемным зарядом. При возникновении ионизационных процессов в газовом промежутке к поверхности воды устремляются ионы, отдельные электроны и их лавины, которые провоцируют появление стримеров. Такая физическая природа разряда обуславливает облучение воды потоком электронов с энергией до 10 кЭВ, кроме того, из-за присутствия в воздухе при нормальном давлении достаточного количества кислорода, появление мягкого на длинах волн (0,38–0,42) мкм и жесткого ультрафиолетового излучения (0,23–0,28) мкм. Динамичное движение лавин и стримеров порождает СВЧ излучение на частотах 0,5–10 ГГц. Излучения приводят к появлению высоких концентраций озона  $\text{O}_3$ , радикалов  $\text{OH}^\cdot$  и перекиси водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$  в газовом промежутке и воде, отмечено появление синглетного кислорода. Повышенная влажность газа в разрядном промежутке затрудняет образование озона, но ускоряет образование  $\text{OH}^\cdot$  радикалов. Эти процессы дополнительно приводят к активации процессов очистки воды, разложению в ней органических и неорганических соединений, воздействию на ионы металлов с большим молекулярным весом.

Экспериментальная установка обработки растворов воды лавиностримерными разрядами содержит реактор с электропроводящим основанием, в реактор организованы патрубки входа и выхода очищенной воды и воздуха с озоном. Над реактором установлены электроды с малым радиусом кривизны. К электродам и электропроводящему по-

крытию подключен источник электрического питания формирующий лавиностримерный разряд над поверхностью воды [9].

Источник высокого напряжения через резонансный формирователь импульсов напряжения обеспечивает подачу напряжения 40 кВ к электродам. Благодаря резонансному ограничению на электродах формируются импульсы напряжения длительностью 0,5–1,0 мкс с наносекундным фронтом [7]. В разрядном промежутке над поверхностью раствора возникает лавиностримерный разряд. Разряд занимает весь объем над водным раствором, при ширине реактора – 5 см. Для реализованного лавиностримерного разряда подтверждено наличие излучений в разрядном промежутке в диапазоне длин волн СВЧ излучения в области (0,5–6,0) ГГц, в области мягкого УФ с длиной волны  $\lambda = 0,32$  мкм и жесткого УФ  $\lambda = (0,24–0,28)$  мкм, в  $\beta$  – излучения интенсивностью до 10 кэВ. На экспериментальной установке с лавиностримерным разрядом были реализованы излучения на уровне предельно допустимых для человека уровней излучения (ПДУ для СВЧ, УФ, рентгеновского излучения). Было обнаружено наличие в разрядном промежутке синглетного кислорода перекиси водорода.

Для оценки комплексного воздействия лавиностримерного разряда на загрязненные воды выбрали органическое вещество в виде 5 и 2 (об) % раствора фенола в дистиллированной воде, а также метилоранж. Контроль взаимодействия растворов с лавиностримерным разрядом осуществлялся по поглощению света, проходящего через раствор с помощью оптического спектрометра AvaSpec-3648 и по исследованию появляющихся взвесей [13; 14; 17; 18; 19; 20].

В качестве модели органического вещества использовался и метилоранж ( $C_{14}H_{14}N_3O_3SNa$ ), который известен как гелиантин или бензолсульфонат является кислотно-основным индикатором, синтетическим органическим красителем из группы азокрасителей и одновременно является солью натрия. Водородный показатель pH водных растворов меняет цвет метилоранжа от красного в кислотной до оранжевого в нейтральной среде и желтому в щелочной среде. В результате воздействия лавиностримерного разряда цвет раствора не

менялся, что свидетельствовало об отсутствии влияния разрядных явлений на pH воды, на которую воздействовал ЛСР.

Структурная формула метилоранжа близка к формуле аминокислот, то есть растворы метилоранжа обладают с ними общими химическими свойствами. Такие вещества как белки и протеины – высокомолекулярные азотсодержащие органические вещества, линейные гетерополимеры, структурным компонентом которых являются аминокислоты, связанные пептидными связями аналогичны растворам метилоранжа. Кроме того, они аналогичны «белкам», которые в химии определяются терминами «пептид» и «полипептид», Эти «белки» являются олигомерами, включающими до 10 аминокислот иногда встречаются молекулы, содержащие от 10 до 100 аминокислот, а крупные полипептиды могут содержать и более 100 аминокислот. Чаще всего белковые структуры содержат сотни аминокислот, поэтому граница по количеству аминокислот и по молекулярной массе, между белками и полипептидами весьма условна. В то же время большинство белков гидрофильны, поэтому белковые молекулы имеют сравнительно большие размеры, они не могут образовывать истинных растворов, а формируют только коллоиды [2]. Они внешне проявляются через эффект Тиндаля рассеянием пучка света при прохождении через раствор. Белковые молекулы, несмотря на большие размеры, не осаждаются в водных растворах, так как осаждению белковых молекул препятствует броуновское движение молекул воды – фактор стабилизации раствора. Поэтому использование раствора метилоранжа позволило оптимальным образом моделировать и оценивать применение технологии обработки ЛСР для деструктивной очистки вод от белковых включений, красителей.

Появление частиц гидровзвесей и определение их размеров осуществлялось с применением оптического малоуглового метода измерения размеров [8]. Время воздействия на раствор фенола выбирали от 5 до 30 минут с 5-минутными интервалами. По ослаблению света оказалось возможным оценивать воздействие лавиностримерного разряда на раствор фенола. После воздействия разряда на раствор, вначале образовались гели бурого цвета в диа-

пазоне длин волн 0,86–1,3 мкм, по которым можно судить о появлении парохинона и ортохинона. После 30 минут воздействия в растворе появлялись взвеси, свидетельствующие о появлении углерода. Обработка приводила к осветлению раствора и осаждению частиц углерода, выделению окислов углерода. Фильтрация на фильтре Петрянова полностью очищала воду от взвесей, оставляя прозрачный раствор (воду).

**Выводы и рекомендации.** Исследовано влияние лавиностримерных разрядов на водные растворы фенола. Показано, что применение лавиностримерных разрядов позволяет более эффективно и с малыми затратами энергии осуществить разложение фенола в воде с разложением фенола на углерод, его окислы и воду. Установлена применимость разрядных технологий с применением лавиностримерных разрядов как универсального средства очистки воды от органических соединений, тяжелых металлов, гелей. Проведенные исследования показывают возможность универсальной очистки воды при использовании лавиностримерного разряда.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асиновский, Э. И. Волновой пробой газовых промежутков. Волновой пробой в распределенных системах / Э. И. Асиновский, Л. М. Василяк, В. В. Марковец // ТВТ. – 1983. – Т. 21. – Вып. 3. – С. 371–577.
2. Васильев, А. И. Исследование «Advanced Oxidation Process» на примере раствора метилоранжа в воде / А. И. Васильев, Л. М. Василяк, А. Л. Дриго // Материалы V Всерос. конф. «Физическая электроника». – Махачкала, ИПЦ ДГУ. – 2008. – С. 61–64.
3. Влияние обработки низкотемпературной плазмой на химический состав и микробиологические показатели лекарственного растительного сырья / М. В. Богма, Н. А. Османова, А. А. Ерузин [и др.] // Химия растительного сырья. – 2011. – № 1. – С. 137–140.
4. Горячев, В. Л. Электроразрядный метод очистки воды. Состояние проблемы и перспективы / В. Л. Горячев, Ф. Г. Рутберг, В. Н. Федюкович // Известия академии наук: энергетика. – 1998. – № 1. – С. 40–55.
5. Коренман, М. И. Фотометрический анализ. Методы определения органических соединений / М. И. Коренман. – М.: Химия, 1975. – 358 с.
6. Неницеску, К. Д. Органическая химия / К. Д. Неницеску. – М.: Иностранная литература, 1962. – Т. 1. – 132 с.
7. О возможности использования анодного микропотока для очистки воды от органических примесей / Л. Т. Бугаенко, Т. А. Калинина, Г. В. Ковалев, А. М. Сизиков // Химия высоких энергий. – 2003. – Т. 37. – № 5. – С. 397.
8. Оптико-электронный метод измерения параметров аэрозольных выбросов аварийных и автономных дизель-генераторных станций / З. И. Арсамаков, А. А. Вакулко, Л. М. Макальский, В. Т. Медведев // Вестник МЭИ. – 2002. – № 5. – С. 95–100.
9. Очистка воды от загрязняющих веществ путем использования лавиностримерных / О. Е. Кондратьева, А. В. Кухно, Л. М. Макальский, О. М. Цеханович // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17. – № 5 (2). – С. 673–678.
10. Очистка воды с применением электроразрядной обработки / Н. А. Яворовский, В. Д. Соколов, Ю. Л. Сколупович, И. С. Ли // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 1. – С. 12–14.
11. Пат. SU № 259711, МПК C02F 1/48. Способ очистки промышленных сточных вод от фенола / Губергриц М. Я. [и др.]; заявитель и патентообладатель Ин-т химии АН Эстонской ССР. – № 1259619; опубл. 20.03. 1973, Бюл. № 15. – 1 с.
12. Петров, А. А. Органическая химия / А. А. Петров, Х. В. Бальян, А. Т. Трощенко. – М.: Высшая школа, 1973. – 622 с.
13. Long-Term Sustainability of a High-Energy, Low-Diversity Crustal Biome / L. Li-Hung, W. Pei-Ling, R. Douglas, J. Lippmann-Pipke. – Science 314 (5798), (2006): 479. – Doi:10.1126/science.1127376.
14. Lubicki, P. High voltage pulse application for the destruction of the Gramnegative bacterium Yersinia enterocolitica / P. Lubicki, S. Jayaram // Bioelectrochem. Bioenergetics. – 1997. – V. 43. – № 1. – P. 135–141.
15. Ono, R. Dynamics of ozone and OH radicals generated by pulsed corona discharge in humid air flow reactor measured by laser spectroscopy / R. Ono, T. Oda // J. Appl. Phys. – 2003. – V. 93. – № 10. – P. 5876–5882.
16. Ono, R. Measurement of hydroxyl radicals in pulsed corona discharge / R. Ono, T. Oda // J. Electrostatics. – 2002. – V. 55. – № 3–4. – P. 333–342.
17. Oxidative decoloration of dyes by pulsed discharge plasma in water / A. T. Sugiarto, S. Ito, T. Ohshima [et al.] // J. Electrostatics. – 2003. – V. 58. – № 1–2. – P. 135–145.
18. Pulsed high-voltage discharge plasma for degradation of phenol in aqueous solution / Y. S. Chen, X. S. Zhang, Y. C. Dai, W. K. Yuan // Separation and Purification Technol. – 2004. – V. 34. – № 1–3. – P. 5–12.
19. Pulsed high-voltage electric discharge disinfection of microbially contaminated liquids

/ A. Anpilov, E. Barkhudarov, N. Christofi, V. Kop'ev, I. Kosyri, M. Taktakishvili, Y. Zadiraka // Lett. Appl. Microbiol. – 2002. – V. 35. – № 1. – P. 90–94.

20. Sun, B. Use of a pulsed highvoltage discharge for removal of organic compounds in aqueous solution / B. Sun, M. Sato, J. S. Clements // J. Phys. D : Appl. Phys. – 1999. – V. 32. – № 15. – P. 1908–1915.

21. Watanabe, S. T. Study on decay characteristics of OH radical density in pulsed discharge in Ar/H<sub>2</sub>O / S. T. Watanabe // Jap. J. Appl. Phys. – P. 1. – 2004. – V. 43. – № 1. – P. 315–320.

## REFERENCES

1. Asinovskiy E.I., Vasilyak L.M., Markovets V.V. Volnovoy probay gazovykh promezhutkov. Volnovoy probay v raspredelennykh sistemakh [Wave Breakdown of Gas Intervals. Wave Breakdown in the Distributed Systems]. *TVT*, 1983, vol. 21, iss. 3, pp. 371-577.

2. Vasilyev A.I., Vasilyak L.M., Drigo A.L. Issledovanie «Advaced Oxidation Process» na primere rastvora metiloranzha v vode [The Research “Advaced Oxidation Process” on the Example of Methyl Orange Solution in Water]. *Materialy V Vserossiyskoy konferentsii «Fizicheskaya elektronika»* [Materials of the 5<sup>th</sup> All-Russian Conference “Physical Electronics”]. Makhachkala, IPTs DGU Publ., 2008, pp. 61-64.

3. Bogma M.V., Osmanova N.A., Eruzin A.A., et al. Vliyanie obrabotki nizkotemperaturnoy plazmoy na khimicheskiy sostav i mikrobiologicheskie pokazateli lekarstvennogo rastitelnogo syrja [Influence of Processing by Low-Temperature Plasma on the Chemical Composition and Microbiological Indicators of Medicinal Vegetable Raw Materials]. *Khimiya rastitelnogo syrja*, 2011, no. 1, pp. 137-140.

4. Goryachev V.L., Rutberg F.G., Fedyukovich V.N. Elektrorazryadnyy metod ochistki vody. Sostoyaniye problemy i perspektivy [Electro-Discharge Method of Water Purification. Status of the Problem and Prospects]. *Izvestiya akademii nauk: energetika*, 1998, no. 1, pp. 40-55.

5. Korenman M.I. *Fotometricheskyy analiz. Metody opredeleniya organicheskikh soedineniy* [Photometric Analysis. Methods of Organic Compounds Determination]. Moscow, Khimiya Publ., 1975. 358 p.

6. Nenitsesku K.D. *Organicheskaya khimiya* [Organic Chemistry]. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1962, vol. 1. 132 p.

7. Bugaenko L.T., Kalinina T.A., Kovalev G.V., Sizikov A.M. O vozmozhnosti ispolzovaniya anodnogo mikrorazryada dlya ochistki vody ot organicheskikh primesey [About the Possibility of Using Anode

Microcategory for Water Treatment from Organic Impurity]. *Khimiya vysokikh energiy*, 2003, vol. 37, no. 5, p. 397.

8. Arsamakov Z.I., Vakulko A.A., Makalskiy L.M., Medvedev V.T. Optiko-elektronnyy metod izmereniya parametrov aerazolnykh vybrosov avariynykh i avtonomnykh dizel-generatornykh stantsiy [Optical-Electronic Method of Measuring the Parameters of Aerosol Emissions of Emergency and Autonomous Diesel-Generator Stations]. *Vestnik MEI*, 2002, no. 5, pp. 95-100.

9. Kondratyeva O.E., Kukhno A.V., Makalskiy L.M., Tsekhanovich O.M. Ochistka vody ot zagryaznyayushchikh veshchestv putem ispolzovaniya lavinostrimernykh [Water Purification from Pollutants by Using the Avalanche-Streamer Discharges]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2015, vol. 17, no. 5 (2), pp. 673-678.

10. Yavorovskiy N.A., Sokolov V.D., Skolubovich Yu.L., Li I.S. Ochistka vody s primeneniem elektrorazryadnoy obrabotki [Water Purification with Application of Electro-Discharge Processing]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*, 2000, no. 1, pp. 12-14.

11. Gubergrits M.Ya, et al. *Pat. SU № 259711, MPK C02F 1/48. Sposob ochistki promyshlennykh stochnykh vod ot fenola* [The SU Patent no. 259711, MPK C02F 1/48. Way of Industrial Sewage Waters Treatment from Phenol]. Applicant and Patent Holder Institute of Chemistry of Academy of Sciences of Estonian SSR, no. 1259619. Published March 20, 1973, Bulletin no. 15. p. 1.

12. Petrov A.A., Balyan Kh.V., Troshchenko A.T. *Organicheskaya khimiya* [Organic Chemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973. 622 p.

13. Li-Hung Lin, Pei-Ling Wang, Douglas R., Lippmann-Pipke J. Long-Term Sustainability of a High-Energy, Low-Diversity Crustal Biome. *Science*, 2006, vol. 314 (5798), p. 479. DOI:10.1126/science.1127376.

14. Lubicki P., Jayaram S. High-voltage pulse application for the destruction of the Gramnegative bacterium *Yersinia enterocolitica*. *Bioelectrochem. Bioenergetics*, 1997, vol. 43, no. 1, pp. 135-141.

15. Ono R., Oda T. Dynamics of ozone and OH radicals generated by pulsed corona discharge in humid air flow reactor measured by laser spectroscopy. *J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 93, no. 10, pp. 5876-5882.

16. Ono R., Oda T. Measurement of hydroxyl radicals in pulsed corona discharge. *J. Electrostatics*, 2002, vol. 55, no. 3-4, pp. 333-342.

17. Sugiarto A.T., Ito S., Ohshima T., et al. Oxidative de-coloration of dyes by pulsed discharge plasma in water. *J. Electrostatics*, 2003, vol. 58, no. 1-2, pp. 135-145.

18. Chen Y.S., Zhang X.S., Dai Y.C., Yuan W.K. Pulsed high-voltage discharge plasma for degradation of phenol in aqueous solution. *Separation and Purification Technol.*, 2004, vol. 34, no. 1-3, pp. 5-12.

19. Anpilov A., Barkhudarov E., Christofi N., et al. Pulsed high-voltage electric discharge disinfection of microbially contaminated liquids. *Lett. Appl. Microbiol.*, 2002, vol. 35, no. 1, pp. 90-94.

20. Sun B., Sato M., Clements J.S. Use of a pulsed high-voltage discharge for removal of organic compounds in aqueous solution. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 1999, vol. 32, no. 15, pp. 1908-1915.

21. Watanabe S.T. Study on decay characteristics of OH radical density in pulsed discharge in Ar/H<sub>2</sub>O. *Jap. J. Appl. Phys.*, 2004, vol. 43, no. 1, pp. 315-320.

### **Information About the Authors**

**Leonid M. Makalskiy**, Candidate of Sciences (Engineering), Senior Researcher, Winner of Russian Federation Government Award, Associate Professor, Department of Engineering Ecology and Labour Protection, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Krasnokazarmennaya St., 14, 11250 Moscow, Russian Federation, mak1306@mail.ru.

**Olga M. Tsekhanovich**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Department of Sociocultural Activity and Tourism, Gzhel State University, Elektroizolyator Town, 67, 140155 Moscow Region, Russian Federation, olgagzhel@mail.ru.

### **Информация об авторах**

**Леонид Михайлович Макальский**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лауреат Премии Правительства РФ, доцент кафедры инженерной экологии и охраны труда, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (МЭИ), ул. Красноказарменная, 14, 11250 г. Москва, Российская Федерация, mak1306@mail.ru.

**Ольга Михайловна Цеханович**, кандидат технических наук, доцент кафедры социально-культурной деятельности и туризма, Гжельский государственный университет, пос. Электроизольатор, 67, 140155 Московская область, Российская Федерация, olgagzhel@mail.ru.