

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА ВОДОРОДА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ В ЖИДКОФАЗНЫХ СРЕДАХ*

Н.А. Булычев^{1,2}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
д. 53, Ленинский пр-т, Москва, 53119991, Россия
тел.: +7(499)135-78-90; e-mail: nbulychev@mail.ru

²Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)
д. 4, Волоколамское шоссе, Москва, 125993, Россия

doi: 10.15518/isjaee.2020.01-06.77-83

Заключение совета рецензентов: 04.12.19 Заключение совета экспертов: 09.12.19 Принято к публикации: 13.12.19

В настоящей работе показано, что инициируемая в жидкофазных средах в разрядном промежутке между электродами низкотемпературная плазма способна эффективно разлагать водородсодержащие молекулы органических соединений с образованием газообразных продуктов, в которых доля водорода составляет более 90 % об. В качестве исходных веществ были использованы органические соединения (спирты, эфиры) и их смеси. Было показано, что производительность по водороду при использовании смесей не уступает индивидуальным исходным веществам.

Метод оптической спектроскопии применялся для подтверждения образования атомарного водорода в реакциях плазменного разложения жидкостей. Показана зависимость интенсивности свечения разряда от его параметров и материалов разрядных электродов. Обнаружено, что одновременное возбуждение электрического дугового разряда и акустической кавитации в воде, органических жидкостях и их смесях является эффективным методом для синтеза газообразного водорода и различных видов твердых наночастиц.

Ультразвуковое воздействие выше порога кавитации интенсифицирует тепло- и массообменные процессы в обрабатываемой среде, способствует гомогенизации дисперсных систем, активации поверхности твердых частиц, появлению дефектов в кристаллических структурах за счет дислокаций и образования вакансионных комплексов, в сочетании с электрическим разрядом, способствующим появлению ионизованного состояния вещества (плазмы); такое воздействие способно разлагать сложные молекулы до атомарного состояния с последующей рекомбинацией и образованием простых молекул. Показано, что это энергетически выгодный способ конверсии жидкофазных соединений, стимулированный термически неравновесной плазмой, производящей активные частицы – возбужденные молекулы и радикалы, что позволяет инициировать цепные реакции, в том числе и энергетически разветвленные, и за счет этого существенно ускорить процесс конверсии жидкости и понизить температуру, при которой такая конверсия может происходить.

Ключевые слова: оптическая спектроскопия; электрический разряд; ультразвук; водород.

APPLICATION OF OPTICAL SPECTROSCOPY FOR STUDY ON PROCESS OF HYDROGEN SYNTHESIS IN ELECTRIC DISCHARGE IN LIQUID-PHASE MEDIA

N.A. Bulychev^{1,2}

¹P.N. Lebedev Physical Institute of RAS
53 Leninsky Ave., 119991, Moscow, Russia

²Moscow Aviation Institute (National Research University)
4 Volokolamskoe Drive, Moscow, 125993, Russia

* Булычев Н.А. Применение оптической спектроскопии для исследования процесса синтеза водорода в электрическом разряде в жидкофазных средах // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2020;01-06:77-83.



In this work, a low-temperature plasma initiated in liquid media between electrodes has been shown to be able to decompose hydrogen containing organic molecules resulting in obtaining gaseous products with volume part of hydrogen higher than 90%. As feedstocks, organic compounds (alcohols, esters) as well as direct water-hydrogen emulsions obtained by ultrasonic treatment are used. It is shown that hydrogen productivity from emulsions is not less than that from individual substances.

Optical spectroscopy is used to confirm the formation of atomic hydrogen in the reactions of plasma decomposition of liquids. The measurement of the amount of the gas mixture formed during the decomposition of organic liquids shows that the output is highly dependent on the discharge current, and also on the volume of the discharge, which can vary depending on the distance between the electrodes in the reaction chamber. In current experiments, the discharge current is from 4A to 8A, the discharge voltage depending on the type of liquid is 30–45 V. It is shown that this is an energy-efficient method for the conversion of liquid-phase compounds, stimulated by a thermally nonequilibrium plasma producing active particles: excited molecules and radicals, which allows one to initiate chain reactions, including energy-branched ones, and thereby significantly accelerate the process of liquid conversion and lower the temperature at which such a conversion can occur.

Keywords: optical spectroscopy; electric discharge; ultrasound; hydrogen.

Сведения об авторе: д-р хим. наук, ведущий научный сотрудник Физического института им. П.Н. Лебедева РАН; профессор кафедры физической химии Московского авиационного института.

Образование: МГАТХТ им. М.В. Ломоносова (2003 г.).

Область научных интересов: наноматериалы; ультразвук; кавитация; плазма; полимеры; дисперсные системы.

Публикации: 250.
h-index 15

Information about the author: D.Sc. in Chemistry, Chief Researcher, P.N. Lebedev Physics Institute; Professor of Physical Chemistry Department of Moscow Aviation Institute.

Education: Moscow State Academy of Fine Chemical Technology, 2003.

Research interests: nanomaterials; ultrasound; cavitation; plasma; polymers; dispersed systems.

Publications: 250.



Николай Алексеевич Булычев
Nikolay Bulychev

1. Введение

В 2006 г. группа ученых для создания эффективного заслона изменению климата Земли разработала обращение к Главам Большой восьмерки – «Столетний Меморандум», в котором зафиксировала острую необходимость в развитии энергогенерации, основанной на возобновляемых и экологически чистых невозобновляемых источниках энергии для получения экологически чистого универсального энергоносителя – водорода [1]. Производство водорода является важным направлением альтернативной энергетики [2].

В 2000 г. научная общественность, отмечая грандиозный вклад одного из основателей водородной энергетики президента Международной ассоциации водородной энергетики профессора Т.Н. Везироглу и выдвигая его на Нобелевскую премию, акцентировала исключительную важность водорода как основного энергоносителя Водородной цивилизации [3].

Данная идея легла в основу концепции Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология», издаваемого на протяжении 20 лет под редакцией А.Л. Гусева (Россия) и академика

Т.Н. Везироглу (США), и отражена в более чем 5 000 научных статей и научных обзоров этого журнала (2000–2020 гг.).

Одним из важных направлений наиболее эффективного производства водорода является плазменный электролиз.

2. Теоретический анализ

В предыдущих работах было показано, что в жидкости в интенсивном ультразвуковом поле выше порога кавитации может существовать особая форма электрического разряда [4–10], которая может быть использована для акустоплазмохимических реакций разложения жидкофазных соединений различного химического состава и их смесей на простые молекулы из составляющих их элементов. Теоретическое описание этих представлений, а также математическая модель даны в работе [9]. Важным условием протекания таких процессов являлось наличие в жидкости зоны двухфазной парожидкостной смеси с особыми условиями электрического пробоя. В ста-

ционных условиях такие зоны создавались за счет эффекта развитой кавитации, порождаемой интенсивными ультразвуковыми колебаниями. Количество образующегося водорода, а также химический состав, размеры, морфологию, оптические и другие свойства этих наночастиц можно легко регулировать с помощью параметров плазменного разряда, материалов электродов и состава жидкостей. Измерение количества газовой смеси, образующейся при разложении органических жидкостей, показывает, что производительность сильно зависит от тока разряда, а также от объема разряда, который может меняться в зависимости от расстояния между электродами в реакционной камере. В проводимых экспериментах сила тока разряда составляет от 4 А до 8 А, напряжение разряда в зависимости от типа жидкости – 30÷45 В.

3. Экспериментальная часть

В данной работе была сделана попытка получить более полное представление о физико-химическом процессе генерации водорода в плазме в сочетании с ультразвуковой кавитацией. Впервые возможности оптической спектроскопии были применены для изучения образования атомарного водорода в зоне акустоплазменного разряда, который имеет достаточно интенсивное свечение. Для этого электрический разряд в жидкой среде инициировали с помощью вольфрамовых и цинковых электродов [11].

Фотография экспериментальной установки приведена на рис. 1.



Рис. 1 – Установка для проведения экспериментов по синтезу водорода и анализу спектров свечения плазмы [11]
 Fig. 1 – Experimental setup for the synthesis of hydrogen and analysis of the plasma emission spectra [11]

На рис. 2 и 3 представлены результаты оптического анализа свечения плазмы в режиме развитой кавитации.

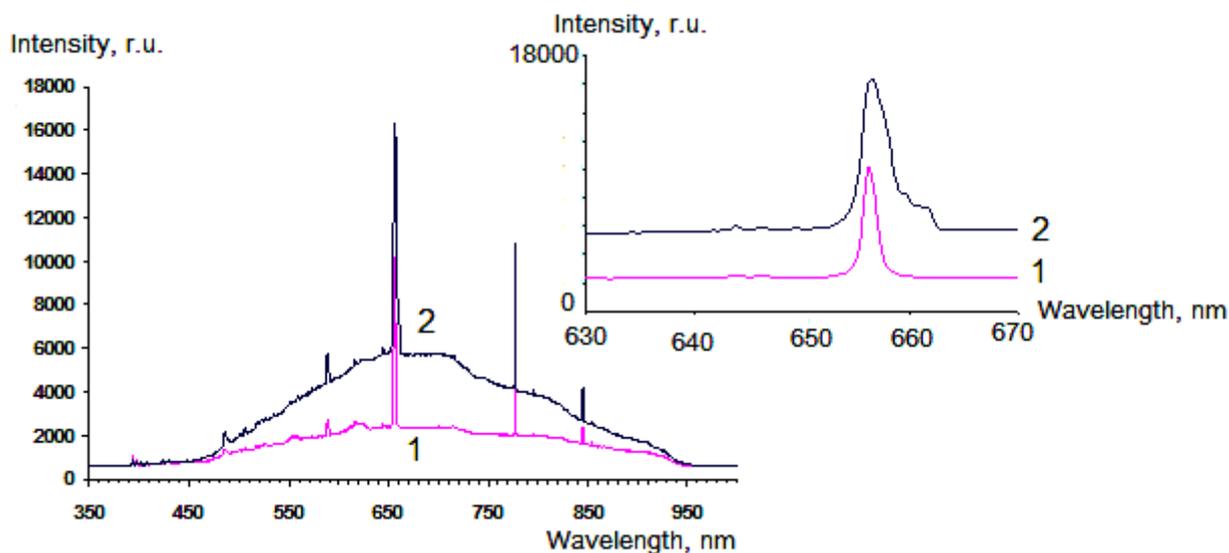


Рис. 2 – Оптические спектры плазменного разряда на вольфрамовых электродах в воде:
 1 – начальная стадия (0÷1 мин); 2 – стабильный режим (после 1 мин)
 Fig. 2 – Optical spectra of a plasma discharge on tungsten electrodes in water:
 1 – initial stage (0÷1 min); 2 – stable mode (after 1 min)



На начальной стадии плазменного разряда спектры излучения состоят из узких линий атомной эмиссии водорода (650÷660 нм) и кислорода

(720÷730 нм). Однако в процессе разряда широкая полоса, соответствующая тепловому равновесному излучению оксида вольфрама, растет монотонно.

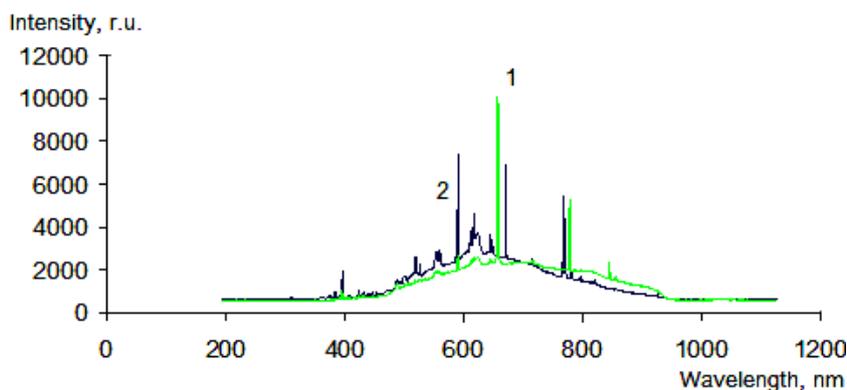


Рис. 3 – Оптические спектры плазменного разряда на вольфрамовых и цинковых электродах в воде: 1 – вольфрам; 2 – цинк
Fig. 3 – Optical spectra of a plasma discharge on tungsten and zinc electrodes in water: 1 – tungsten; 2 – zinc

Во время роста полосы оксида вольфрама линия водорода, наложенная на эту полосу, расширяется. Это расширение можно объяснить частичным захватом атомов водорода наночастицами оксида вольфрама с последующими соответствующими деформациями линии излучения.

4. Результаты и их обсуждение

Спектры излучения света плазменного разряда в воде с вольфрамовым и цинковым электродами демонстрируют явные различия как в широких полосах, так и в положениях линий водорода. Различия в спектральных положениях узких линий для вольфрамовых и цинковых электродов выявляют активные взаимодействия водорода и других ионов, создаваемых в плазменном разряде, с наночастицами, созданными в процессе синтеза. Это согласуется с полученными ранее данными о количестве получаемого водорода в разряде на разных электродах [11, 12].

Износ электродов определяется тугоплавкостью материала и электрофизическими параметрами процесса. В силу этих причин вольфрамовые электроды изнашиваются намного медленнее, чем цинковые. Выбор материала был обусловлен необходимостью подтвердить это предположение, определить стехиометрические соотношения взаимодействующих веществ для подтверждения гипотезы, что большая часть образующегося атомарного кислорода расходуется на окисление материала электродов, а также экспериментами по получению наночастиц из материалов электродов [6, 7]. Процессы тепло- и массопереноса в подобных системах под действием температурных полей рассмотрены в работах [13–17].

Результаты анализа газообразных продуктов реакций в акустоплазменном разряде в жидких средах подтвердили данные оптической спектроскопии и показали, что разложение воды в акустоплазменном

разряде приводит к образованию почти чистого водорода (порядка 95÷98 %). Схема химических превращений приведена в работе [12]. При разложении органических жидкостей образуется газ, который также содержит оксиды углерода, но их концентрация не превышает 5÷6 %, так как основное количество углерода при разложении органических жидкостей образует твердые частицы: наночастицы углерода и наночастицы оксидов материалов разрядных электродов, которые впоследствии могут быть использованы как компоненты композиционных материалов [18–25]. Отличительным признаком и существенным преимуществом данного метода является то, что одновременное воздействие на зону реакции термически неравновесной плазмы и ультразвуковой кавитации приводит к созданию условий, недостижимых в других случаях и обуславливает протекание реакций при локальной концентрации большого количества энергии и активных частиц. Это позволяет осуществлять реакции, которые в других случаях не идут или идут с малой скоростью.

Для эффективного выделения производимого водорода в цикле плазменного электролиза разработан целый спектр систем очистки [26–29].

Работа является важной для обеспечения экологической, экономической и энергетической безопасности государства [30].

5. Заключение

Существенное увеличение поверхности раздела между фазами в жидкости в режиме развитой ультразвуковой кавитации приводит к протеканию новых акустоплазмохимических процессов, которые в обычных разрядах в жидкости не наблюдаются или имеют малый выход конечных продуктов реакции. В результате проведенных экспериментов доказано, что реализация электрических разрядов в кавити-

рующей жидкофазной среде приводит к генерации атомарного водорода с последующей рекомбинацией и образованием молекул водорода. Кроме того, ультразвуковые колебания высокой интенсивности способствуют возникновению в жидкофазных средах интенсивных акустических течений, что приводит к ускорению диффузионных процессов в зоне реакции и повышает ее скорость.

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Президента Российской Федерации № МД-3964.2018.8.

Acknowledgments

This work has been partially supported by Research grant of President of Russian Federation, project No. MD-3964.2018.8

Список литературы

[1] Гусев, А.Л. Столетний меморандум от 13 ноября 2006 года Главам Большой восьмерки / А.Л. Гусев, Т.Н. Везируглу [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2007. – № 3. – С. 11.

[2] Гусев, А.Л. Основные экологические проблемы Нижегородской области и пути перехода к водородной экономике / А.Л. Гусев // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2006. – № 1. – С. 13–24.

[3] Ilkaev, R.I. Justification for Nomination of prof. Dr. T. Nejat Veziroglu for Nobel Prize in Economics / R.I. Ilkaev [et al.] // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). – 2000. – Is. 1. – P. 4–5.

[4] Bulychev, N.A. Plasma discharge with surround glow in the liquid phase under the impact of ultrasound / N.A. Bulychev [et al.] // Bull. Lebedev Phys. Inst. – 2012. – Vol. 39. – No. 7. – P. 214–220.

[5] Klassen, N. Laser and electric arc synthesis of nanocrystalline scintillators / N. Klassen [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2010. – Vol. 57. – No. 3. – P. 1377–1381.

[6] Bulychev, N.A. Nanoscale metal oxide particles produced in the plasma discharge in the liquid phase upon exposure to ultrasonic cavitation. 1. Method for producing particles / N.A. Bulychev [et al.] // Bull. Lebedev Phys. Inst. – 2014. – Vol. 41. – No. 9. – P. 264–268.

[7] Burkhanov, I.S. Nanoscale metal oxide particles produced in the plasma discharge in the liquid phase upon exposure to ultrasonic cavitation. 2. Sizes and stability. Dynamic light scattering study / I.S. Burkhanov [et al.] // Bulletin of the Lebedev Physics Institute – 2014. – Vol. 41. – No. 10. – P. 297–304.

[8] Ivanov, A.V. Properties of metal oxide nanoparticles prepared by plasma discharge in water with ultrasonic cavitation / A.V. Ivanov [et al.] // Int. J. Nanotechnol. – 2017. – Vol. 14. – No. 7/8. – P. 618–626.

[9] Bulychev, N.A. Hydrogen Production by Low-Temperature Plasma Decomposition of Liquids / N.A.

Bulychev [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42. – P. 20934–20938.

[10] Bulychev N.A. Peculiarities of Metal Oxide Nanoparticles Obtained in Acoustoplasma Discharge / N.A. Bulychev [et al.] // J. Tech. Phys. Lett. – 2016. – Vol. 42. – Is. 9. – P. 105–110.

[11] Булычев, Н.А. Получение водорода в акустоплазменном разряде из прямых водно-водородных эмульсий / Н.А. Булычев, М.Н. Кириченко, М.А. Казарян // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2018. – Vol. 17. – P. 63–69.

[12] Bulychev, N.A. Plasma Discharge in Liquid Phase Media under Ultrasonic Cavitation as a Technique for Synthesizing Gaseous Hydrogen / N.A. Bulychev [et al.] // Bull. Lebedev Phys. Inst. – 2018. – Vol. 45. – No. 9. – P. 263–266.

[13] Formalev, V.F. Heat transfer with absorption in anisotropic thermal Protection of high-temperature products / V.F. Formalev, S.A. Kolesnik, B.A. Garibyan // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences – 2019. – Vol. 86 – I. 5. – P. 35–49.

[14] Formalev, V.F. Mathematical modeling of heat transfer in anisotropic plate with internal sinks / V.F. Formalev, S.A. Kolesnik, B.A. Garibyan // Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (CMMASS'2019) AIP Conf. Proc. – 2019. – Vol. 2181. – Article 020003.

[15] Formalev, V.F. On Thermal Solitons during Wave Heat Transfer in Restricted Areas / V.F. Formalev, S.A. Kolesnik // High Temperature – 2019. – Vol. 57. – I. 4. – P. 498–502.

[16] Formalev, V.F. Heat Transfer in a Half-Space with Transversal Anisotropy Under the Action of a Lumped Heat Source / V.F. Formalev, S.A. Kolesnik // Journal of Engineering Physics and Thermophysics – 2019. – Vol. 92. – I. 1. – P. 52–59.

[17] Formalev V.F. Simulation of Nonequilibrium Heat Transfer in an Anisotropic Semispace Under the Action of a Point Heat Source / V.F. Formalev, É.M. Kartashov, S.A. Kolesnik // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – Vol. 92. – I. 6. – P. 1537–1547.

[18] Ioni, Yu.V. Preparation of Finely Dispersed Nanographite / Yu.V. Ioni [et al.] // Inorganic Materials. – 2011. – Vol. 47. – No. 6. – P. 597–602.

[19] Bulychev, N.A. Nanotechnological Aspects of Temperature-Dependent Decomposition of Polymer Solutions / N.A. Bulychev [et al.] // Nanoscience and Technology. An International Journal. – 2018. – Vol. 9. – I. 2. – P. 91–97.

[20] Nikiforov, V.N. Elastic properties of HTSC ceramics / V.N. Nikiforov, N.A. Bulychev, V.V. Rzhvskii // Bulletin of the Lebedev Physical Institute – 2016. – Vol. 43. – I. 2 – P. 74–79.

[21] Ganiev, R.F. Effect of mechanical activation on surface modification in aqueous pigment disperse systems / R.F. Ganiev [et al.] // Doklady Chemistry. – 2006. – Vol. 407. – P. 54–56.



[22] Bulychev, N.A. Ultrasonic Treatment Assisted Surface Modification of Inorganic and Organic Pigments in Aqueous Dispersions / N.A. Bulychev [et al.] // Journal of the Balkan Tribological Association. – 2008. – Vol. 1. – No. 14. – P. 30–39.

[23] Bulychev N.A. Structure of Adsorption Layers of Amphiphilic Copolymers on Inorganic or Organic Particle Surfaces / N.A. Bulychev [et al.] // Macromol. Chem. Phys. – 2010. – Vol. 9. – No. 211. – P. 971–977.

[24] Rudnev, A.V. Study of stability and dispersion composition of calcium hydroxyapatite in aqueous suspensions by capillary zone electrophoresis / A.V. Rudnev [et al.] // Russian Journal of Analytical Chemistry. – 2013. – Vol. 68. – I. 8. – P. 700.

[25] Kirilina, Yu.O. Organic-inorganic hybrid hydrogels based on linear poly(N-vinylpyrrolidone) and products of hydrolytic polycondensation of tetramethoxysilane / Yu.O. Kirilina [et al.] // Polymer Science Series B. – 2009. – Vol. 51. – Is. 3–4. – P. 135.

[26] Gusev, A.L. Nano-composites for Hydrogen Membranes and Fuel Cells / A.L. Gusev, M.A. Kazaryan. // Bayer Material Science (BMS) & The International Science and Technology Center (ISTC). Research Conference, Moscow, Russia, 23–24 January, 2007. – P. 22–23.

[27] Гусев, А.Л. Физико-химические аспекты применения углеродных и пористых стеклянных мембран с модифицированной поверхностью для селекции кислорода и водорода из газовой смеси, содержащей хлор / А.Л. Гусев, А.А. Боброва, М.А. Казарян // Сборник материалов XII Международной Научной Конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул в лазерных, плазменных и нанотехнологиях», посвященная 100-летию со дня рождения академика И.К. Кикоина. Под ред. В.Е. Черковца; 31 марта – 4 апреля 2008 г. Звенигород. М. ЦНИИАТОМИНФОРМ, г. Троицк, ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 2008. – 110 с., с. 64.

[28] Gusev, A.L. Cleaning system for corrosive gases and hydrogen, Chemical and Petroleum Engineering / A.L. Gusev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2009. – Vol. 45. – No. 9–10. – P. 640; DOI: 10.1007/s10556-010-9251-7.

[30] Gusev, A.L. Manufacture Nano-composites Membranes for clearing Chlorine / A.L. Gusev, M.A. Kazaryan // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE). – 2007. – Is. 4. – P. 200–201.

[31] Гусев, А.Л. Экономическая, энергетическая, экологическая и геополитическая безопасность России в 21 веке. Нужна ли России Водородная энергетика? Экономика, экология и общество России в 21-м столетии / А.Л. Гусев, Ю.П. Дядюченко, В.М. Чертов // Труды 4-ой Международной научно-практической конференции. Т.1. Спб.: Нестор, 2002. – 400 с.

References

[1] Gusev A.L. Vesiroglu, T.N. et al. Centennial Memorandum of November 13, 2006 to the Heads of the

Group of Eight (Stoletniy memorandum ot 13 noyabrya 2006 goda Glavam Bol'shoy vos'merki). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2007;(3):11 (in Russ.).

[2] Gusev A.L. The main environmental problems of the Nizhny Novgorod region and the transition to a hydrogen economy (Osnovnyye ekologicheskiye problemy Nizhegorodskoy oblasti i puti perekhoda k vodorodnoy ekonomike). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2006;(1):13 (in Russ.).

[3] Ilkaev R.I., Trutnev Y.A., Gusev A.L., Kijek J.C., Hampton M.D., Scherbak Y.P. Justification for Nomination of prof. Dr. T. Nejat Veziroglu for Nobel Prize in Economics. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2000;(1):4–5.

[4] Bulychev N.A., Kazaryan M.A., Gridneva E.S., Murav'ev E.N., Solinov V.F., Koshelev K.K., Kosheleva O.K., Sachkov V.I. Chen S.G. Plasma discharge with surround glow in the liquid phase under the impact of ultrasound. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2012;39(7):214–220.

[5] Klassen N., Krivko O., Kedrov V.V., Shmurak S.Z., Kiselev A.P., Shmyt'ko I.M., Kudrenko E.A., Shekhtman A.A., Bazhenov A.V., Fursova T.N., Abramov V.O., Bulychev N.A., Kisterev E.V. Laser and electric arc synthesis of nanocrystalline scintillators. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2010;57(3):1377–1381.

[6] Bulychev N.A., Kazaryan M.A., Chaikov L.L., Burkhanov I.S., Krasovskii V.I. Nanoscale metal oxide particles produced in the plasma discharge in the liquid phase upon exposure to ultrasonic cavitation. 1. Method for producing particles. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2014;41(9):264–268.

[7] Burkhanov I.S., Chaikov L.L., Bulychev N.A., Kazaryan M.A., Krasovskii V.I. Nanoscale metal oxide particles produced in the plasma discharge in the liquid phase upon exposure to ultrasonic cavitation. 2. Sizes and stability. Dynamic light scattering study. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2014;41(10):297–304.

[8] Ivanov A.V., Nikiforov V.N., Shevchenko S.V., Timoshenko V.Yu., Pryadun V.V., Bulychev N.A., Bychenko A.B., Kazaryan M.A. Properties of metal oxide nanoparticles prepared by plasma discharge in water with ultrasonic cavitation. *Int. J. Nanotechnol.*, 2017;14(7/8):618–626.

[9] Bulychev N.A., Kazaryan M.A., Averyushkin A.S., Chernov A.A., Gusev A.L. Hydrogen Production by Low-Temperature Plasma Decomposition of Liquids. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017; (42):20934–20938.

[10] Bulychev N.A., Kazaryan M.A., Nikoforov V.N., Shevchenko S.N., Yakunin V.G., Timoshenko V.Yu., Bychenko A.B., Sredin V.G. Peculiarities of Metal Oxide Nanoparticles Obtained in Acoustoplasma Discharge. *J. Tech. Phys. Lett.*, 2016;42(9):105–110.

[11] Bulychev N.A., Kirichenko M.N., Kazaryan M.A. Obtaining of Hydrogen in Acoustoplasma Discharge from Direct Water-Hydrocarbon Emulsions (Polucheniye vodoroda v akustoplazmennom razryade iz pryamykh vodno-uglevodorodnykh emul'siy). *Interna-*



tional Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 2018;17;63–69 (in Russ.).

[12] Bulychev N.A., Kazaryan M.A., Ethiraj A., Chaikov L.L. Plasma Discharge in Liquid Phase Media under Ultrasonic Cavitation as a Technique for Synthesizing Gaseous Hydrogen. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2018;45(9):263–266.

[13] Formalev V.F., Kolesnik S.A., Garibyan B.A. Heat transfer with absorption in anisotropic thermal Protection of high-temperature products. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2019;86(5):35–49.

[14] Formalev V.F., Kolesnik S.A., Garibyan B.A. Mathematical modeling of heat transfer in anisotropic plate with internal sinks. *Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (CMMASS'2019) AIP Conf. Proc.*, 2019;(2181);020003.

[15] Formalev V.F., Kolesnik S.A. On Thermal Solitons during Wave Heat Transfer in Restricted Areas. *High Temperature*, 2019;57(4):498–502.

[16] Formalev V.F., Kolesnik S.A. Heat Transfer in a Half-Space with Transversal Anisotropy Under the Action of a Lumped Heat Source. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019;92(1):52–59.

[17] Formalev V.F., Kartashov É.M., Kolesnik S.A. Simulation of Nonequilibrium Heat Transfer in an Anisotropic Semispace Under the Action of a Point Heat Source. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019; 92(6):1537–1547.

[18] Ioni Yu.V., Tkachev S.V., Bulychev N.A., Gubin S.P. Preparation of Finely Dispersed Nanographite. *Inorganic Materials*, 2011;47(6):597–602.

[19] Bulychev N.A., Kuznetsova E.L., Bodryshev V.V., Rabinskiy L.N. Nanotechnological Aspects of Temperature-Dependent Decomposition of Polymer Solutions. *Nanoscience and Technology. An International Journal*, 2018; 9(2);91–97.

[20] Nikiforov V.N., Bulychev N.A., Rzhetskii V.V. Elastic properties of HTSC ceramics. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2016;43(2);74–79.

[21] Ganiev R.F., Bulychev N.A., Fomin V.N., Arutyunov I.A., Eisenbach C.D., Zubov V.P., Malukova E.B. Effect of mechanical activation on surface modification in aqueous pigment disperse systems. *Doklady Chemistry*, 2006;(407);54–56.

[22] Bulychev N.A., Kisterev E.V., Arutunov I.A., Zubov V.P. Ultrasonic Treatment Assisted Surface Modification of Inorganic and Organic Pigments in Aqueous Dispersions. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2008;1(14):30–39.

[23] Bulychev N., Dervaux B., Dirnberger K., Zubov V., Du Prez F.E., Eisenbach C.D. Structure of Adsorption

Layers of Amphiphilic Copolymers on Inorganic or Organic Particle Surfaces. *Macromol. Chem. Phys.*, 2010;9(211);971–977.

[24] Rudnev A.V., Vanifatova N.G., Dzherayan T.G., Lazareva E.V., Bulychev N.A. Study of stability and dispersion composition of calcium hydroxyapatite in aqueous suspensions by capillary zone electrophoresis. *Russian Journal of Analytical Chemistry*, 2013;68(8):700.

[25] Kirilina Yu.O., Bakeeva I.V., Bulychev N.A., Zubov V.P. Organic-inorganic hybrid hydrogels based on linear poly(N-vinylpyrrolidone) and products of hydrolytic polycondensation of tetramethoxysilane. *Polymer Science Series B*, 2009;51(3–4):135.

[26] Gusev A.L., Kazaryan M.A. Nano-composites for Hydrogen Membranes and Fuel Cells. *BayerMaterialScience (BMS)&The International Science and Technology Center (ISTC) Research Conference*, Moscow, Russia, 23–24 January, 2007; pp. 22–23.

[27] Gusev A.L., Bobrova A.A., Kazaryan M.A. Physico-chemical aspects of the use of carbon and porous glass membranes with a modified surface for the selection of oxygen and hydrogen from a gas mixture containing chlorine (Fiziko-khimicheskiye aspekty primeneniya uglerodnykh i poristykh steklyannykh membran s modifitsirovannoy poverkhnost'yu dlya selektsii kisloroda i vodoroda iz gazovoy smesi, soderzhashchey khlor). *Sbornik materialov XII Mezhdunarodnoy Nauchnoy Konferentsii «Fiziko-khimicheskiye protsessy pri selektsii atomov i molekul v lazernykh, plazmennyykh i nanotekhnologiyakh», posvyashchennaya 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika I.K. Kikoina. Ed. V.E. Cherkovets. March, 31 – April, 4, 2008. Zvenigorod. TSNIIATOMINFORM, Troitsk, GNTS RF TRINITI, 2008;(110):64 (in Russ.)*.

[28] Gusev A.L. Cleaning system for corrosive gases and hydrogen. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2009;45(9–10);640.

[29] Gusev A.L., Kazaryan M.A., Manufacture Nano-composites Membranes for clearing Chlorine. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2007;(4):200–201 (in Russ.).

[30] Gusev A.L., Dyadyuchenko Yu.P., Chertov V.M. Economic, energy, environmental and geopolitical security of Russia in the 21st century. Does Russia Need Hydrogen Energy? Economics, Ecology and Society of Russia in the 21st Century (Ekonomicheskaya, energeticheskaya, ekologicheskaya i geopoliticheskaya bezopasnost' Rossii v 21 veke. Nuzhna li Rossii Vodorodnaya energetika? Ekonomika, ekologiya i obshchestvo Rossii v 21-m stoletii). *Trudy 4-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. St. Petersburg, Nestor, 2002; p. 400 (in Russ.)*.

Транслитерация по BSI

