



ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА В АКУСТОПЛАЗМЕННОМ РАЗРЯДЕ В ПОТОКЕ ЖИДКОФАЗНОЙ СРЕДЫ*

Н.А. Булычев^{1,2}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
д. 53, Ленинский пр-т, Москва, 119991, Россия
тел.: +7(499)132-62-47
e-mail: nbulychev@mail.ru

²Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)
д. 4, Волоколамское шоссе, Москва, 125993, Россия
тел.: +7(499)135-78-90; e-mail: nbulychev@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.01-03.042-048

Заключение совета рецензентов: 07.12.18 Заключение совета экспертов: 11.12.18 Принято к публикации: 14.12.18

Проведено исследование плазменного разряда в потоке жидкости под высоким давлением с целью получения газообразного водорода. Были разработаны методы и оборудование для возбуждения плазменного разряда в потоке жидкой среды. Поток жидкости под избыточным давлением направляется в гидродинамический излучатель, расположенный на входе реактора, в котором в жидкости за счет перепада давления и понижения энтальпии потока формируется сверхзвуковое двухфазное парожидкостное течение при пониженном давлении. В реакторе расположены электроды, между ними с помощью внешнего источника питания создается электрическое поле, напряженность которого превышает порог пробоя этой двухфазной среды, приводящее к возбуждению низкотемпературного тлеющего квазистационарного плазменного разряда.

Проведена теоретическая оценка параметров такого разряда. Показано, что инициируемая в условиях потока жидкофазной среды в разрядном промежутке между электродами низкотемпературная плазма способна эффективно разлагать водородсодержащие молекулы органических соединений в жидкости с образованием газообразных продуктов, в которых доля водорода составляет более 90 %. Кроме того, при моделировании процесса были сделаны теоретические расчеты напряжения и тока разряда, которые согласуются с данными эксперимента. Производительность реакционной установки объемом 50 мл, применявшейся в экспериментах, составила 1,5 л водорода в минуту при использовании в качестве сырья смеси кислородсодержащих органических соединений. При разложении этих соединений в плазме в незначительных количествах образуются также твердофазные продукты: наночастицы углерода и наночастицы оксидов материалов разрядных электродов.

Ключевые слова: плазма; ультразвуковая кавитация; водород; акустоплазменный разряд; жидкофазная среда.

*Булычев Н.А. Получение водорода в акустоплазменном разряде в потоке жидкофазной среды // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;01-03:42-48.



SYNTHESIS OF HYDROGEN IN ACOUSTOPLASMA DISCHARGE IN A LIQUID-PHASE STREAM

N.A. Bulychev^{1,2}

¹Lebedev Physical Institute of RAS
53 Leninsky Av., Moscow, 119991, Russia
tel.: +7(499)132-62-47, e-mail: nbulychev@mail.ru

²Moscow Aviation Institute
4 Volokolamskoe drive, Moscow, 125993, Russia
tel.: +7(499)135 78 90, e-mail: nbulychev@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.01-03.042-048

Referred 7 December 2018 Received in revised form 11 December 2018 Accepted 14 December 2018

In this paper, the plasma discharge in a high-pressure fluid stream in order to produce gaseous hydrogen was studied. Methods and equipment have been developed for the excitation of a plasma discharge in a stream of liquid medium. The fluid flow under excessive pressure is directed to a hydrodynamic emitter located at the reactor inlet where a supersonic two-phase vapor-liquid flow under reduced pressure is formed in the liquid due to the pressure drop and decrease in the flow enthalpy. Electrodes are located in the reactor where an electric field is created using an external power source (the strength of the field exceeds the breakdown threshold of this two-phase medium) leading to the initiation of a low-temperature glow quasi-stationary plasma discharge.

A theoretical estimation of the parameters of this type of discharge has been carried out. It is shown that the low-temperature plasma initiated under the flow conditions of a liquid-phase medium in the discharge gap between the electrodes can effectively decompose the hydrogen-containing molecules of organic compounds in a liquid with the formation of gaseous products where the content of hydrogen is more than 90%. In the process simulation, theoretical calculations of the voltage and discharge current were also made which are in good agreement with the experimental data. The reaction unit used in the experiments was of a volume of 50 ml and reaction capacity appeared to be about 1.5 liters of hydrogen per minute when using a mixture of oxygen-containing organic compounds as a raw material. During their decomposition in plasma, solid-phase products are also formed in insignificant amounts: carbon nanoparticles and oxide nanoparticles of discharge electrode materials.

Keywords: plasma; ultrasonic cavitation; hydrogen; acoustoplasma discharge; a liquid-phase medium.



*Николай Алексеевич Булычев
Nikolay Bulychev*

Сведения об авторе: д-р хим. наук, ведущий научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН; профессор МАИ.

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

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

Публикации: 220.
h-index 12

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

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

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

Publications: 220.

1. Введение

Одной из актуальных проблем современной возобновляемой энергетики является разработка методов и технологий получения водорода, который может быть использован как топливо, поэтому необходимо разработать альтернативные методы получения водорода из различного доступного сырья.

В предыдущих работах [1–5] было показано, что в жидкости в интенсивном ультразвуковом поле выше порога кавитации может существовать особая форма электрического разряда, которая может быть

эффективно использована для синтеза газообразного водорода из жидкофазных соединений различного химического состава и их смесей. Акустоплазменные процессы протекали в условиях стационарного разряда в закрытом реакторе [5, 6]. Очевидно, что, наряду с несомненными преимуществами такого процесса, есть и ряд недостатков, таких как необходимость теплоотвода, непостоянство состава реакционной смеси по ходу реакции, окисление материалов электродов.

Вместе с тем эксперименты по возбуждению ультразвуковых колебаний в жидкофазных средах в

гидродинамических излучателях [7] дают основания полагать, что возможно сконструировать точный акустоплазмохимический реактор для син-

теза водорода в потоке реакционной смеси, проходящей через камеру и зону разряда под высоким давлением.

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
α	Коэффициент ионизации
γ	Коэффициент вторичной эмиссии электронов и ионов
v	Скорость потока электронов, м/с
μ	Подвижность электронов и ионов, м ² /(В·с)
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
E	Электрическое поле, В/м
F_e, F_i	Плотности потоков электронов и ионов, Вт/м ²
j	Плотность тока, А/м ²
L	Расстояние от катода, м
n_e, n_i	Плотность электронов и ионов, м ⁻³
p	Давление, Па
q	Заряд, Кл
V	Напряжение, В
<i>Индексы нижние</i>	
e	Электрон
i	Ион
A	Анод
ed	Дрейф электронов
K	Катод

2. Теоретический анализ

При прохождении жидкости под высоким давлением через сопло гидродинамического излучателя происходят разрывы сплошности среды и возникает множество осциллирующих пузырьков, заполненных паром и газом, и наоборот, капель жидкости. В электрическом поле такие пузырьки и капли могут выстраиваться в цепочки, образуя множество газовых микроканалов в промежутке между электродами. Поскольку газ и пар внутри камеры находятся при высоком давлении и температуре, то из-за ионизации в них создается достаточное количество электронов, которое облегчает электрический пробой и поддержание разряда, по своим свойствам во многом напоминающего аномальный тлеющий разряд. С помощью подхода, развитого в работе [1], где из простых физических соображений была сделана оценка напряжения пробоя, можно теоретически описать основные электрофизические характеристики такого разряда.

Плотности электронов n_e и положительных ионов n_i подчиняются уравнениям баланса числа частиц, которые в общем случае представляют собой уравнения непрерывности:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \text{div} F_e = v_i n_e - \beta n_e n_i, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \text{div} F_i = v_i n_i - \beta n_e n_i.$$

Здесь F_e, F_i – плотности потоков электронов и ионов. Допустим, что давление достаточно велико для того, чтобы длины пробега частиц были малыми по сравнению с характерными размерами разрядной области.

В отсутствие или при малости продольных градиентов плотностей, что всегда справедливо в случае достаточно длинного разрядного промежутка, продольные потоки имеют чисто дрейфовый характер:

$$F_e = -n_e \mu_e E, F_i = -n_i \mu_i E, \quad (2)$$

где μ_e и μ_i – подвижности электронов и ионов соответственно. Поле E подчиняется уравнению Пуассона:

$$\text{div} E = 4\pi e(n_i - n_e). \quad (3)$$

Поле E является суммарным результатом воздействия внешнего напряжения, приложенного к электродам, и пространственных зарядов, образующихся в разряде. В правой части (1) представлены скорости рождения и объемной рекомбинации зарядов, при этом частота ионизации v_i зависит от поля.

Будем считать разрядный промежуток небольшим по сравнению с поперечными размерами электродов. Ось x направим от катода к аноду. Исходим из уравнений непрерывности (1) для плотностей зарядов. Пренебрегая рекомбинацией, обратим внимание, что объемные источники зарядов связаны лишь с ионизацией газа:

$$q = v_i n_e = \alpha v_{ed} n_e,$$



а потоки – чисто дрейфовые. Здесь α – ионизационный коэффициент; $v_{ед}$ – дрейфовая скорость электронов. Будем оперировать плотностями тока $j_e = -en_e v_{ед}$, $j_i = en_i v_{ед}$. В стационарном случае

$$dj_e / dx = \alpha j_e, \quad dj_i / dx = -\alpha j_e, \quad j_e + j_i = j = const. \quad (4)$$

Третье равенство в (4), говорящее о постоянстве плотности полного тока, является следствием первых двух. Граничное условие на катоде ($x = 0$) описывает вторичную эмиссию, на аноде ($x = L$) – отсутствие ионной эмиссии.

$$j_{eK} = \gamma j_{iK} = [\gamma / (1 + \gamma)] j; \quad j_{iA} = 0; \quad j_{eA} = j. \quad (5)$$

Если начать интегрировать уравнение (4) для j_e от катода с учетом первого условия (5), при $\alpha[E(x)] = const$, получим

$$j_e = \frac{\gamma}{1 + \gamma} j e^{\alpha x}, \quad j_i = j \left(1 - \frac{\gamma}{1 + \gamma} e^{\alpha x}\right). \quad (6)$$

Условие самоподдержания разряда непосредственно вытекает из (4) и (5):

$$\int_0^L \alpha [E(x)] dx = \ln(1 + 1/\gamma). \quad (7)$$

При теоретических и численных исследованиях разрядов для функции $\alpha[E]$ широко пользуются удобной эмпирической формулой, предложенной Таунсендом:

$$\alpha = A p \exp(-Bp / E). \quad (8)$$

где постоянные коэффициенты A и B определяются из эксперимента; p – давление в газе. Полагая электрическое поле однородным в разрядном промежутке ($E(x) = const \approx E_K$, $E = 0$ при $x \geq L$), из тривиального соотношения $V_K = E_K L$, определяющего рабочее падение потенциала, и формул (7) и (8) получаем, что

$$e^{\alpha L} - 1 = 1/\gamma, \quad \alpha L = \ln(1 + 1/\gamma), \quad (9)$$

$$V_K = \frac{B_{pd}}{C + \ln(pL)}, \quad \frac{E_K}{p} = \frac{B}{C + \ln(pL)}, \quad C = \ln \frac{A}{\ln(1 + 1/\gamma)}.$$

Эти формулы связывают падение потенциала в разрядном промежутке V_K с «толщиной» последнего pL и определяют параметрическую зависимость падения потенциала V_K и поля на катоде E_K от плотности тока j , при этом параметром служит толщина слоя L . Для достаточно больших значений тока при-

ближенно установим аналитическую связь этих величин. В области разряда отток электронов в приложенном электрическом поле осуществляется очень быстро по сравнению с тяжелыми ионами, так что всегда имеют место приближенные соотношения $n_i \gg n_e$ и $j_i \gg j_e$. Поэтому из уравнения Пуассона можно вывести следующую формулу:

$$n_+ \approx (4\pi e)^{-1} dE / dx \approx E_K / 4\pi e d, \quad (10)$$

причем здесь уже принято во внимание, что поле в слое на самом деле не постоянно, а уменьшается от E_K до нуля. Отсюда

$$j = (1 + \gamma) en_+ \mu_+ E_K \approx (1 + \gamma) \mu_+ E_K^2 / 4\pi d \approx (1 + \gamma) \mu_+ V_K^2 / 4\pi d^3. \quad (11)$$

Из (11) видно, что с ростом напряжения ток растет квадратично, определяя вид той части вольтамперной характеристики, которая реализуется при больших значениях тока. Полностью же форма вольтамперной характеристики, описываемая формулами (9) при произвольных значениях тока разряда, позволяет заключить, что в условиях разряда в смешанном паро-газожидкостном потоке будет происходить ионизация водородсодержащих молекул жидкости, как это имело место в стационарном разряде [6].

3. Результаты экспериментальных исследований

Для экспериментального подтверждения этого вывода были разработаны методы и оборудование для возбуждения плазменного разряда в потоке жидкой среды. Поток жидкости, который необходимо подвергнуть плазмохимическому воздействию, через трубопровод под избыточным (более 10 атм.) давлением направляется в гидродинамический излучатель, расположенный на входе реактора, в котором в жидкости за счет перепада давления и понижения энтальпии потока формируется сверхзвуковое двухфазное парожидкостное течение при пониженном давлении. В реакторе расположены электроды, между которыми с помощью внешнего источника питания создается электрическое поле, напряженность которого превышает порог пробоя этой двухфазной среды, приводящее к возбуждению низкотемпературного тлеющего квазистационарного плазменного разряда. После плазмохимического воздействия жидкость входит в сужающийся участок трубопровода и собирается в резервуаре-сепараторе, откуда может снова подаваться в реакционную камеру, а образовавшийся газообразный водород выходит через отверстия или отводной канал (рис. 1).



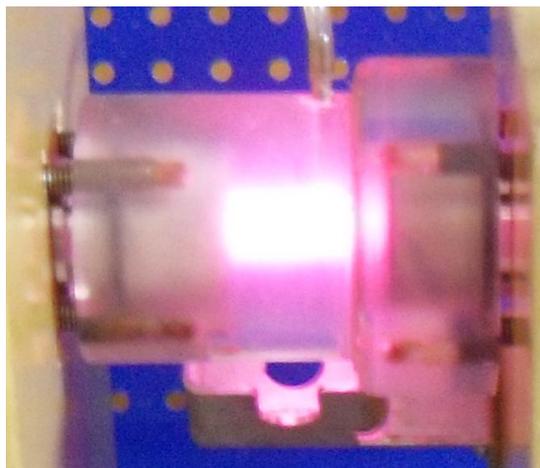
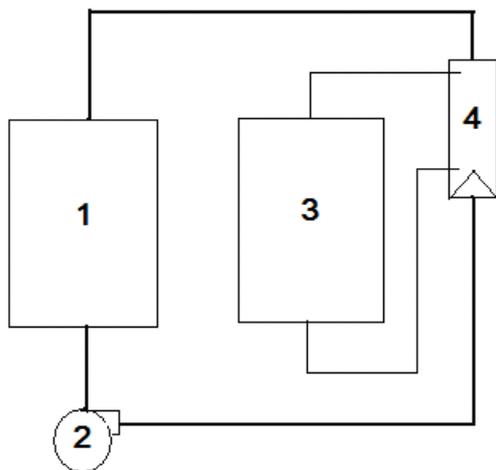


Рис. 1 – Схема и фотография работающей установки для проведения экспериментов: 1 – резервуар-сепаратор для жидкофазной среды; 2 – насос высокого давления; 3 – источник питания разряда; 4 – реакционная камера
Fig. 1 – Scheme and photo of experimental setup: 1 – reservoir-separator for a liquid-phase medium; 2 – high-pressure pump; 3 – discharge power source; 4 – reaction chamber

Анализ газообразных продуктов реакций, происходящих в акустоплазменном разряде в потоке жидких сред, позволил установить, что основным газообразным продуктом является водород. В качестве сырья использовались: вода, спирты и их смеси. Установлено, что при разложении воды происходит образование практически чистого водорода (97 %), при разложении органических жидкостей образуются также оксиды углерода (5 ÷ 6 %). В экспериментах применялась реакционная установка объемом 50 мл. Если в качестве сырья использовалась смесь кислородсодержащих органических соединений, то производительность этой установки составляла 1,5 л водорода в минуту. При разложении этих соединений в плазме образуются также в незначительных количествах твердофазные продукты: наночастицы углерода и наночастицы оксидов материалов разрядных электродов, которые впоследствии могут быть использованы как компоненты композиционных материалов [8–16]. На образование этих побочных продуктов расходуется большая часть углерода и кислорода, содержащихся в молекулах исходной жидкости, тем самым газообразная смесь значительно обогащена водородом.

Физико-химический принцип действия метода заключается в разложении в плазме сложных водородсодержащих молекул и их ионизации с последующей рекомбинацией с образованием простых молекул: H_2 , H_2O , C , CO_2 , MO_x , где M – материал плазменных электродов. Плазменный разряд, инициируемый в реакторе между металлическими и графитовыми электродами, поддерживается специально сконструированным источником постоянного или переменного напряжения, позволяющим исследовать влияние характеристик плазмы на скорость реакции и химический состав ее продуктов [17].

4. Заключение

Получение водорода путем разложения сложных водородсодержащих молекул органических соединений в плазменном разряде в потоке жидкости является перспективным методом. Жидкость, проходящая через гидродинамический излучатель под большим давлением, образует двухфазную парожидкостную смесь, в которой происходит ионизация и разложение молекул под действием электрического разряда. Существенным преимуществом предлагаемого метода является возможность использования широкого спектра исходных веществ.

Благодарности

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

Acknowledgments

The work was partly supported by the grant of the President of the Russian Federation No. MD-3964.2018.8

Список литературы

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Bulychev, N.A. Study of Effect of Plasma Discharge on Microbiological Objects in a Liquid for Plasma Sterilization of Water / N.A. Bulychev [et al.] // *Bulletin of A.M. Prokhorov Academy of Engineering Sciences*. – 2013. – No. 2. – P. 83–90.

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

[9] Bulychev, N.A. Peculiarities of Metal Oxide Nanoparticles Obtained in Acoustoplasma Discharge / N.A. Bulychev [et al.] // *J. Tech. Phys. Lett.* – 2016. – Vol. 42. – No. 9. – P. 105–110.

[10] 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. – No. 2. – P. 91–97.

[11] Nikiforov, V.N. Elastic properties of HTSC ceramics / V.N. Nikiforov, N.A. Bulychev, V.V. Rzhetskii // *Bulletin of the Lebedev Physical Institute*. – 2016. – Vol. 43. – No. 2. – P. 74–79.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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. – No. 8. – P. 700.

[16] 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. – No. 3–4. – P. 135.

[17] Булычев, Н.А. Получение водорода в акустоплазменном разряде из прямых водно-углеводородных эмульсий / Н.А. Булычев, М.Н. Кириченко, М.А. Казарян // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)*. – 2018. – Т. 17. – № 16–18. – С. 38–40.

References

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2014; 41(10):297–304.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Bulychev N.A., Muraviev E.N., Chernov A.A., Kazaryan M.A., Zolezzi A. Study of Effect of Plasma Discharge on Microbiological Objects in a Liquid for Plasma Sterilization of Water. *Bulletin of A.M. Prokhorov Academy of Engineering Sciences*, 2013;(2):83–90.

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

[9] 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.

[10] Bulychev N.A., Kuznetsova E.L., Bodryshev V.V., Rabinskiy L.N. Nanotechnological Aspects of Temperature-Dependent Decomposition of Polymer So-



lutions. *Nanoscience and Technology. An International Journal*, 2018;9(2):91–97.

[11] Nikiforov V.N., Bulychev N.A., Rzhetskii V.V. Elastic properties of HTSC ceramics. *Bulletin of the Lebedev Physical Institute*, 2016;43(2):74–79.

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

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2018;17(16–18):38–40 (in Russ.).

Транслитерация по BSI

XXIV Международная конференция
«Взаимодействие ионов с поверхностью»
(ВИП 2019)

Приглашаем Вас принять участие в работе **24-й Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью (ВИП-2019)»**, которая будет проходить с **19 по 23 августа 2019 г.** в Москве.

Конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью» является традиционной конференцией, посвященной фундаментальным и прикладным аспектам процессов, происходящих при ионной бомбардировке твердых тел. Она проводится с периодичностью один раз в два года, начиная с 1971 года.

Основное внимание уделяется фундаментальным вопросам взаимодействия ионов и плазмы с поверхностью. Рассматриваются также практические приложения.

Программа конференции ВИП-2019 будет включать приглашенные, устные и стендовые доклады по следующим темам:

1. Распыление, структура поверхности, десорбция.
2. Рассеяние и проникновение ионов.
3. Эмиссия ионов, электронов, фотонов и рентгеновского излучения при ионной бомбардировке.
4. Имплантация ионов и модификация поверхности.
5. Ионно-индуцированные процессы в тонких пленках и наноструктурах.
6. Взаимодействие плазмы с поверхностью – физика и технологии

Контакты

Ученый секретарь: Булгадарян Даниэль,
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское шоссе, 31, 115409, Россия, Москва
Tel: +7 (495) 788-56-99, add. 7113

E-mail: isi2019@plasma.mephi.ru (любые вопросы по конференции)
E-mail: isi2019abstract@plasma.mephi.ru (для отправки тезисов)

Издание трудов конференции

До начала работы конференции будет издан сборник расширенных тезисов, индексируемых в РИНЦ, который печатается путем прямого воспроизведения присланных авторами текстов.

Тезисы, полученные оргкомитетом позднее 15 марта 2019 г., в сборник включены не будут. Статьи по материалам докладов будут публиковаться в одном из следующих журналов:

«Известия РАН, серия физическая»,
«Поверхность» (на русском и английском языках)
«Вакуум» (на английском языке).

https://isi2019.mephi.ru/rus/frst_rus.html