



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА ВОДОРОДА В ИНТЕНСИВНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ В ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДАХ*

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.2020.07-18.80-86

Заключение совета рецензентов: 05.03.20 Заключение совета экспертов: 21.04.20 Принято к публикации: 12.05.20

В данной работе проведены экспериментальные исследования процесса получения водорода с помощью интенсивной гидродинамической кавитации в жидких углеводородах. Физико-химические процессы, происходящие в кавитационном пузырьке на последней стадии его сжатия, весьма схожи с процессами, происходящими во взрывной камере. Достижимые при этом значения давления и температуры обеспечивают термодинамическую стабильность продуктов реакции и получение газообразной смеси (аэрозоля) водорода и нанокластеров углерода, что подтверждено теоретическими расчетами. Контролируемое добавление водородсодержащих жидкостей и изменение условий сжатия кавитационных пузырьков позволяют управлять процессом синтеза водорода, что является важным шагом в развитии современных высокотехнологичных методов альтернативной энергетики. Пульсация сферической полости описана уравнениями Кирквуда – Бёте, которые являются одной из наиболее точных математических моделей процессов пульсаций при произвольной скорости движения границы полости. Предложенная модель позволяет полностью описывать процесс пульсаций кавитационных полостей, проводить всесторонние параметрические исследования и оценивать влияние различных параметров процесса на коллапс полостей.

Данная работа выполнена в продолжение экспериментов по кавитационному синтезу углеродных наноструктур. При быстром движении химически чистого бензола (C_6H_6) по профилированному каналу в виде сопла Вентури, в жидкости формируются кавитационные полости, сжимающиеся в рабочей камере, в которой создается резкий скачок давления. Давление в ударной волне, достигающее 80–90 МПа, обеспечивает близкий к адиабатическому сжатию коллапс кавитационных пузырьков. В результате ряда быстро протекающих физико-химических процессов испарения, нагрева и термической диссоциации паров углеводородных жидкостей, в полости синтезируется твердая углеродная фаза и газообразная водородсодержащая фаза, которая затем подвергается разделению.

Ключевые слова: кавитация; углеводородные жидкости; водород; гидродинамическое сжатие; наноструктуры; ударные волны; уравнения Кирквуда – Бёте.

*Булычев Н.А. Экспериментальные исследования процесса синтеза водорода в интенсивной гидродинамической кавитации в жидких углеводородах // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2020;07-18:80-86.



EXPERIMENTAL STUDIES ON PROCESS OF HYDROGEN SYNTHESIS IN INTENSIVE HYDRODYNAMIC CAVITATION IN LIQUID HYDROCARBONS

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 (National Research University)

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

doi: 10.15518/isjaee.2020.07-18.80-86

Referred 5 March 2020 Received in revised form 21 April 2020 Accepted 12 May 2020

This work carries out the experimental studies on the hydrogen production using intensive hydrodynamic cavitation in liquid hydrocarbons. The physical and chemical processes occurring in the cavitation bubble at the last stage of its compression are very similar to the processes occurring in the explosive chamber. The values of pressure and temperature achieved in this case provides the thermodynamic stability of the reaction products and the production of a gaseous mixture (aerosol) of hydrogen and carbon nanoclusters, which is confirmed by theoretical calculations. The controlled addition of hydrogen-containing liquids and the change in the compression conditions of cavitation bubbles make it possible to control the process of hydrogen synthesis, which is an important step in the development of modern high-tech alternative energy methods. The pulsation of a spherical cavity is described by the Kirkwood – Bethe equations, which are one of the most accurate mathematical models of pulsation processes at an arbitrary velocity of the cavity boundary. The model allows you to fully describe the process of pulsations of cavitation cavities, conduct comprehensive parametric studies and evaluate the effect of various process parameters on the collapse of cavities.

This work continues the experiments on cavitation synthesis of carbon nanostructures. With the rapid movement of chemically pure benzene (C₆H₆) along the profiled channel in the form of a Venturi nozzle, cavitation bubbles form in the liquid, which are then compressed in the working chamber, in which a sharp pressure surge is created. The pressure in the shock wave, which reaches 80–90 MPa, ensures the collapse of cavitation bubbles close to adiabatic compression. As a result of the number of rapidly occurring physicochemical processes of evaporation, heating, and thermal dissociation of benzene vapors, a solid carbon phase and a gaseous hydrogen-containing phase are synthesized in the cavitation, which is then subjected to separation.

Keywords: cavitation; hydrocarbon liquids; hydrogen; hydrodynamic compression; nanostructures; shock waves; Kirkwood – Bethe equations.



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 at P.N. Lebedev Physics Institute; Professor at MAI.

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

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

Publications: 220.

1. Введение

Ранее в работе [1] теоретически обосновывалась возможность разложения углеводородных соединений в результате возникновения гидродинамической кавитации в быстротекущей жидкости. В этой и последующих работах [2, 3] рассматривались варианты

кавитационного синтеза углеродных наноструктур (наноалмазов). Идея заключалась в том, что при быстром течении флюида через узкий канал-трещину возникают резкие перепады внутреннего давления. В соответствии с уравнением Бернулли, давление в движущейся жидкости обратно пропорционально квадрату скорости, поэтому в области сужения про-

исходит падение давления, приводящее к возникновению пузырьков газа. Когда флюид вновь попадает в область расширения, давление восстанавливается и происходит схлопывание пузырьков. Как показали расчеты, при этом давление может возрасти на несколько порядков, и его оказывается достаточно для разложения сложных молекул и синтеза наноалмазов и водорода [1]. В работах [1, 2] предполагалось, что флюид содержал также CO₂, но последующий анализ скоростей диффузии из среды схлопывания показал, что достаточной скоростью диффузии обладает

только водород. В связи с этим исходным веществом должен быть углеводородный субстрат, например, алканы или циклические углеводороды.

В настоящей работе был впервые исследован процесс кавитационного синтеза водорода в условиях гидродинамической кавитации. В качестве исходного вещества был выбран бензол, который является маловязкой жидкостью с высоким давлением насыщенного пара при нормальных условиях и высоким содержанием ненасыщенных связей атомов углерода (C₆H₆).

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
γ	Показатель политропы, определяющий состояние газа в полости
σ	Поверхностное натяжение жидкости, Нм
ν	Частота колебаний, Гц
ω	Круговая частота, рад.
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
A, B, n	Определяющие константы модели жидкости
C	Скорость звука, м/с
c	Локальное значение скорости звука, м/с
H	Энтальпия, Дж
P_m	Амплитуда ультразвукового поля, м
$R(t)$	Радиус, м
T	Температура, К
V	Скорость движения границы полости
<i>Индексы нижние</i>	
0	Начальное значение
m	Моментальное значение
<i>Аббревиатуры</i>	
ИК	Инфракрасный
КР	Комбинационное рассеяние

2. Теоретическая часть

При исследовании процессов кавитации одной из основных задач является определение зависимости радиуса пузырька от времени, времени схлопывания пузырька и скорости движения его границы. Одной из наиболее точных моделей для описания процесса пульсации пузырька является модель Кирквуда – Бёте. Эта модель содержит нелинейное дифференциальное уравнение, решение которого может быть получено только с помощью численных методов. В ряде работ предложен и реализован численный алгоритм реше-

ния уравнения Кирквуда – Бёте, основанный на методе Рунге – Кутты – Фельберга 4–5 порядка с адаптивным подбором шага интегрирования [4–7]. Приведены примеры расчетов и параметрический анализ процесса кавитации одиночного пузырька [8–13].

Рассмотрим процесс пульсации и схлопывания сферической кавитационной полости радиуса $R(t)$, где t – время, за счет генерации волн давления источником колебаний.

Движение стенки пузырька в сжимаемой жидкости описывается уравнением Кирквуда – Бёте [4–7]:

$$R \left(1 - \frac{\dot{R}}{c} \right) \ddot{R} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{\dot{R}}{3c} \right) \dot{R}^2 - \left(1 + \frac{\dot{R}}{c} \right) H - \frac{R}{c} \left(1 - \frac{\dot{R}}{c} \right) \dot{H} = 0,$$

$$c = c(t) = \sqrt{c_0^2 + (n-1)H}, \tag{1}$$

$$H = H(t) = \frac{n}{n-1} \frac{A^n}{\rho_0} \left\{ \left[\left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} + B \right]^{\frac{n-1}{n}} - \left(P_0 - P_m \sin \omega t + B \right)^{\frac{n-1}{n}} \right\},$$

где c_0 и P_0 – скорость звука и давление в невозмущенной жидкости; c – локальное значение скорости звука в окрестности поверхности полости; R_0 – на-

чальный радиус полости; H – свободная энтальпия на поверхности полости; P_m – амплитуда ультразвукового поля; $\omega = 2\pi\nu$ – круговая частота (ν – частота

колебаний); σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости (для воды $\sigma = 73 \cdot 10^{-3}$ Н/м); A, B, n – определяющие константы модели жидкости; γ – показатель политропы, определяющий состояние газа в полости ($\gamma = 1$ в случае изотермических пульсаций и $\gamma = 4/3$ в случае адиабатических пульсаций).

Для уравнения (1) должны быть заданы начальные условия:

$$R(0) = R_0, \dot{R}(0) = V_0, \quad (2)$$

где V_0 – начальная скорость движения границы полости.

3. Экспериментальные исследования и их результаты

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Установка включает: по-

лости 1–4; подвижные поршни 5 и 6, связанные между собой штоком 10 с замковым устройством, позволяющим расцепить поршень 6 при достижении им крайнего положения; полости 2 и 3, заполненные рабочей жидкостью (бензолом); сопловой блок 9, выполненный в виде трубки Вентури. Работа установки происходит следующим образом: под действием электромагнитного поля поршень 5 приходит в движение и вытесняет жидкость из полости 2 в полость 3 через сопло. При этом в наименьшем сечении сопла возникает растягивающее напряжение, что приводит к образованию паровых пузырьков (первая фаза кавитации), которые попадают в полость 3. При перемещении поршня 6 в крайнее правое положение (см. рис. 1) происходит срабатывание датчиков 7 и 8 и включение электромеханического привода поршня 6. Поршень 6 получает импульс в обратном направлении, увеличивая давление в полости 3 и создавая условия для энергичного схлопывания паровых пузырьков.

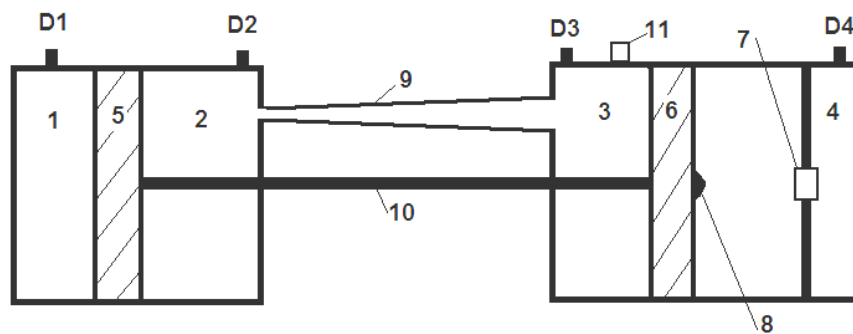


Рис. 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки: D1–D4 – датчики давления; 1–4 – полости; 5, 6 – поршни; 7, 8 – датчики; 9 – сопло; 10 – шток; 11 – клапан

Fig. 1 – Schematic diagram of the experimental setup: D1 – D4 – pressure sensors; 1–4 – cavities; 5, 6 – pistons; 7, 8 – sensors; 9 – nozzle; 10 – rod; 11 – valve

При проведении экспериментов измерялось давление с помощью пьезометрических датчиков в полостях и сопле. В методических экспериментах измерялась скорость поршней и разрежение в полости 3. Значения рабочих давлений находились в диапазоне 80–90 МПа, разрежение в полости 3 составляло около 0,02–0,04 МПа, скорость поршней 5 и 6 была около 2 м/с. Измерение температуры в полости 3 показало, что заметное изменение температуры жидкости в ходе процесса отсутствует. Это позволило в дальнейшем при проведении теоретических исследований считать жидкость баротропной и изотермической.

Рабочий режим в экспериментальной установке адекватно имитирует вторую фазу процесса кавитации: кавитационное схлопывание пузырьков, происходящее в полости 3 в условиях, отвечающих восстановлению давления после выхода пузырьков из трубки Вентури. В результате образующихся в полости 3 условий происходит разложение молекул углеводородной жидкости (бензола) и образование газообразного водорода и наночастиц углерода.

После эксперимента жидкость сливали из рабочего цилиндра. Взвешенные частицы осаждали центрифугированием. Затем переводили в чашку Петри и просматривали под микроскопом. В скрещенных николях анализатора оптического микроскопа многие из частиц давали отчетливую полярографическую картину в виде креста [14]. В отраженном свете в центральной части подобных частиц всегда присутствовало отчетливо заметное включение бурого цвета.

Осадок после центрифугирования и очистки анализировали при помощи ИК-спектрометра Фурье «PU 9804 Philips». Навески двух исследуемых проб массой 0,75 мг и 1 мг размалывали в механической мельнице с 40 мг КВг и прессовали в таблетки диаметром 10 мм. В спектрах присутствуют частоты, отвечающие функциональным группам органических соединений. Углерод C_H_2 - групп диагностируется по асимметричным и симметричным валентным колебаниям 2921 см^{-1} и 2851 см^{-1} , а также по деформационным ножничным и маятниковым колебаниям 1468 см^{-1} и 721 см^{-1} . Помимо полос погло-



щения органических соединений, в спектре заметны линии $2\ 662\ \text{см}^{-1}$, $2\ 510\ \text{см}^{-1}$, $2\ 170\ \text{см}^{-1}$ и $2\ 077\ \text{см}^{-1}$, которые можно интерпретировать как полосы обертоновых и составных частот продольных и поперечных оптических и акустических колебаний решетки алмаза. Возникновение органических соединений, в том числе полимерного характера, при возбуждении кавитации в бензоле совершенно естественно, и само их присутствие является свидетельством реализации режима кавитации в использованном в данной работе устройстве.

Извлеченные из продуктов кавитационной обработки бензола частицы, хотя и содержали линию, близкую к характеристической линии алмаза $1\ 330\ \text{см}^{-1}$, обладали более сложным спектром, в котором эта линия была более широкой. Типичный спектр КР для синтезированных в эксперименте частиц показан на рис. 2. Известно, что уширение линий спектра КР может быть обусловлено малым размером алмазных кластеров, как это наблюдается, например, в спектре КР алмазной пленки, а также присутствием не алмазной примеси (графита, аморфного углерода, углеводородных образований).

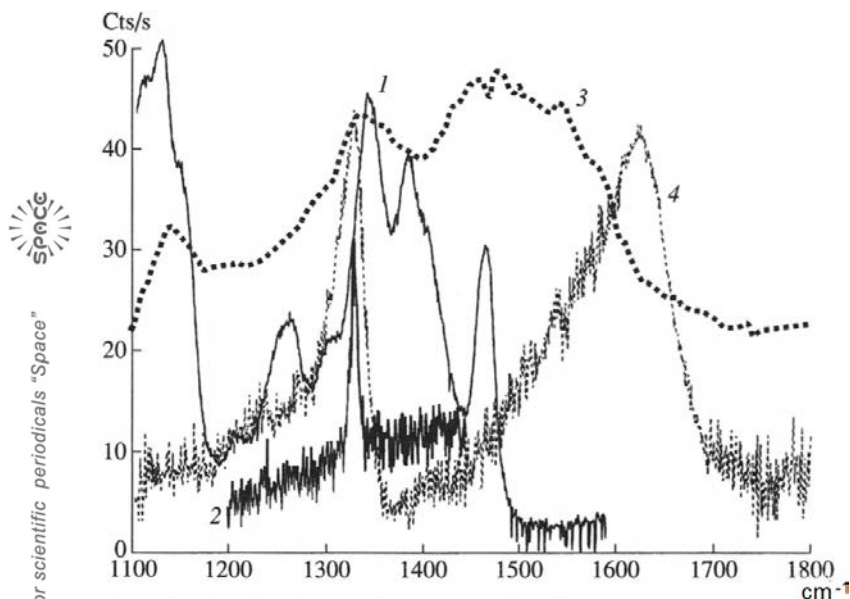


Рис. 2 – Спектр комбинационного рассеяния в области $1\ 100\text{--}1\ 600\ \text{см}^{-1}$ экспериментальной частицы 1 в сравнении с КР-спектром кристалла алмаза 2, алмазной пленки 3 и микроалмазов, полученных путем взрыва 4; исследуемая частица – агрегат размером $14\ \mu\text{м}$; время экспозиции $100\ \text{с}$; длина волны возбуждения $632,8\ \text{нм}$

Fig. 2 – The Raman spectrum in the region of $1\ 100\text{--}1\ 600\ \text{см}^{-1}$ of the experimental particle 1 in comparison with the Raman spectrum of a diamond crystal 2, a diamond film 3 and microdiamonds obtained by explosion 4. The studied particle is an aggregate of size $14\ \mu\text{m}$. Exposure time is $100\ \text{s}$. The excitation wavelength is $632.8\ \text{nm}$

Поскольку давление и температура, поддерживавшиеся в установке, находились в области термодинамической стабильности алмаза, можно заключить, что разложение молекул бензола приводило к возникновению двух индивидуальных веществ – углерода и водорода. Стехиометрические расчеты, основанные на измерении количества бензола и синтезированного углерода, подтверждают этот вывод.

Количество образующегося газообразного водорода оценивалось в $1,5\text{--}2\ \text{л}$ в минуту при импульсном режиме работы установки. Это согласуется с результатами, полученными ранее при исследовании получения водорода в ультразвуковой кавитации [15–21].

4. Заключение

Проведенные исследования показали, что при возбуждении гидродинамической кавитации в рабочей жидкости углеводородного состава (бензол) возникали продукты его разложения в виде газообразного водорода, органических полимеров и частиц твердого углерода. Данные частицы представляют собой агрегаты кристаллических структур нанометрового размера; по крайней мере часть подобных

агрегатов содержит алмазную фазу. Таким образом, экспериментально доказана возможность синтеза водорода при возбуждении кавитации в углеводородсодержащей жидкости.

Список литературы

- [1] Galimov, E.M. Possibility of Natural Diamond Synthesis under Conditions of Cavitation Occurring in a Fast-moving Magmatic Melt / E.M. Galimov // *Nature*. – 1973. – Vol. 243 – P. 389.
- [2] Galimov, E.M. Experimental corroboration of the synthesis of diamond in the cavitation process / E.M. Galimov [et al.] // *Doklady Physics*. – 2004. – Vol. 49 – I. 3 – P. 150–153.
- [3] Voropaev, S.A. Synthesis of diamondlike nanoparticles under cavitation in toluene / S.A. Voropaev [et al.] // *Doklady Physics*. – 2012. – Vol. 57. – I. 10. – P. 373–377.
- [4] 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.
- [5] 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.

[6] Formalev, V.F. Mathematical modeling of heat transfer in anisotropic plate with internal sinks / V.F. Formalev, S.A. Kolesnik, B.A. Garibyan // *AIP Conf. Proc.* – 2019. – Vol. 2181. – article 020003.

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

[8] Gidaspov, V.Y. A software package for simulation of unsteady flows of the reacting gas in the channel / V.Y. Gidaspov, V.K. Golubev, N.S. Severina // *Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*. – 2016. – Vol. 9. – I. 3. – P. 94–104.

[9] Gidaspov, V.Y. Numerical Simulation of the Detonation of a Propane-Air Mixture, Taking Irreversible Chemical Reactions into Account / V.Y. Gidaspov, N.S. Severina // *High Temperature*. – 2017. – Vol. 55. – I. 5. – P. 777–781.

[10] Gidaspov, V.Y. Numerical Study of the Influence of Water Droplets on the Structure of a Detonation Wave in a Hydrogen–Air Fuel Mixture / V.Y. Gidaspov, O.A. Moskalenko, N.S. Severina // *High Temperature*. – 2018. – Vol. 56. – I. 5. – P. 751–757.

[11] Gidaspov, V.Y. Modeling of detonation of metal-gas combustible mixtures in high-speed flow behind a shock wave / V.Y. Gidaspov, N.S. Severina // *High Temperature*. – 2019. – Vol. 57. – I. 4. – P. 514–524.

[12] Borovik, I.N. Influence of the turbulent Prandtl number on numerical simulation reaction flow / I.N. Borovik, E.A. Strokach, N.S. Severina // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2181. – I. 1. – P. 020029.

[13] Severina, N.S. Software complex for solving the different tasks of physical gas dynamics / N.S. Severina // *Periodico Tche Quimica*. – 2019. – Vol. 16. – I. 32. – P. 424–436.

[14] Voropaev, S.A. Photoluminescence of nitrogen-doped nanodiamonds of cavitation synthesis / S.A. Voropaev [et al.] // *Doklady Physics*. – 2014. – Vol. 59. – I. 12. – P. 564–567.

[15] 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.

[16] Bulychev, N.A., Plasma Discharge in Liquid Phase Media under Ultrasonic Cavitation as a Technique for Synthesizing Gaseous Hydrogen / N.A. Bulychev [et al.] // *Bulletin of the Lebedev Physical Institute*. – 2018. – Vol. 45. – I. 9. – P. 263–266.

[17] Bulychev, N.A. On the Hydrogen Production during the Discharge in a Two-Phase Vapor-Liquid Flow / N.A. Bulychev // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. – 2019. – Vol. 46. – I. 7. – P. 219–221.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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*. – Vol. 41. – No. 10. – P. 297–304.

[21] Bulychev, N.A. Obtaining of hydrogen in acoustoplasma discharge in liquids / N.A. Bulychev [et al.] // *Proceedings of SPIE* – 2018. – Vol. 10614. – article number 1061411.

References

[1] Galimov E.M. Possibility of Natural Diamond Synthesis under Conditions of Cavitation Occurring in a Fast-moving Magmatic Melt. *Nature*, 1973;243:389.

[2] Galimov E.M., Kudin A.M., Fisenko A.V., Bykov I.V., Skorobogatskii V.N., Bondarev O.L., Zarubin B.G., Strazdovskii V.V., Barinov A.Yu., Plotnichenko V.G., Aronin A.S. Experimental corroboration of the synthesis of diamond in the cavitation process. *Doklady Physics*, 2004;49(3):150–153.

[3] Voropaev S.A., Shkinev V.M., Dnestrovskii A.Y., Ponomareva E.A., Spivakov B.Y., Galimov E.M., Aronin A.S., Bondarev O.L., Strazdovskii V.V., Skorobogatskii V.N., Eliseev A.A. Synthesis of diamond-like nanoparticles under cavitation in toluene. *Doklady Physics*, 2012;57(10):373–377.

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

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] Gidaspov V.Y., Golubev V.K., Severina N.S. A software package for simulation of unsteady flows of the reacting gas in the channel. *Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, 2016;9(3):94–104.



[9] Gidasov V.Y., Severina N.S. Numerical Simulation of the Detonation of a Propane-Air Mixture, Taking Irreversible Chemical Reactions into Account. *High Temperature*, 2017;55(5):777–781.

[10] Gidasov V.Y., Moskalenko O.A., Severina N.S. Numerical Study of the Influence of Water Droplets on the Structure of a Detonation Wave in a Hydrogen–Air Fuel Mixture. *High Temperature*, 2018;56(5):751–757.

[11] Gidasov V.Y., Severina N.S. Modeling of detonation of metal-gas combustible mixtures in high-speed flow behind a shock wave. *High Temperature*, 2019;57(4):514–524.

[12] Borovik I.N., Strokach E.A., Severina N.S. Influence of the turbulent Prandtl number on numerical simulation reaction flow. *AIP Conference Proceedings*, 2019;2181(1):020029.

[13] Severina N.S. Software complex for solving the different tasks of physical gas dynamics. *Periodico Tche Quimica*, 2019;16(32):424–436.

[14] Voropaev S.A., Dushenko N.V., Shkinev V.M., Ponomareva E.A., Galimov E.M., Aronin A.S., Skorobogatskii V.N., Bondarev O.L., Strazdovskii V.V., Eliseev A.A. Photoluminescence of nitrogen-doped nanodiamonds of cavitation synthesis. *Doklady Physics*, 2014;59(12):564–567.

[15] 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.

[16] 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.

[17] Bulychev N.A. On the Hydrogen Production during the Discharge in a Two-Phase Vapor-Liquid Flow. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2019;46(7):219–221.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

[21] Bulychev N.A., Kazaryan M.A., Kirichenko M.N., Garibyan B.A., Morozova E.A., Chernov A.A. Obtaining of hydrogen in acoustoplasma discharge in liquids. *Proceedings of SPIE*, 2018;10614:061411.



III Международная научно-практическая конференция «Модернизация и инновационное развитие топливно-энергетического комплекса»

Секции конференции

1. Фундаментальные принципы и подходы к исследованию объектов и процессов ТЭК.
2. Машины и механизмы ТЭК.
3. Добыча и переработка природных ресурсов.
4. Ресурсосберегающие технологии.
5. Транспортировка и хранение энерго-ресурсов.
6. Угольная промышленность.
7. Нефтегазовая отрасль.
8. Электроэнергетика.
9. Общие проблемы топливной промышленности.
10. Результаты инновационной деятельности в области энергоэффективности.

Все материалы проходят рецензирование и проверку на антиплагиат.

По итогам конференции будет издан сборник научных трудов с присвоением УДК, ББК, ISSN 2618-8953, полные тексты которого размещаются на сайте Научной электронной библиотеки: <https://elibrary.ru>

Последний день подачи заявки: 9 октября 2020 г.

Организаторы: Санкт-Петербургский филиал Научно-исследовательского центра «МашиноСтроение»

Контактная информация: тел.: 8-960-905-2324. Веб: <http://srcms.ru/spbf/conf4.html>

Эл. почта: spbf.srcms@yandex.ru

srcms.ru/spbf/conf4.html
konferencii.ru/info/127999

