

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

УДК 535.391:621.376
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-202-211>

Поступила в редакцию 23.02.2021
Received 23.02.2021

С. В. Васильев, А. Ю. Иванов, А. В. Копыцкий, А. Л. Ситкевич

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь

**РАЗВИТИЕ ПАРОПЛАЗМЕННОГО ОБЛАКА ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ
НА ОБРАЗЕЦ, НАХОДЯЩИЙСЯ В ЖИДКОСТИ**

Аннотация. Экспериментально исследован процесс формирования парогазового образования у поверхности облучаемого металла. Изучены особенности изменения формы и размеры парогазового «пузыря» на разных стадиях процесса, в том числе и после завершения лазерной обработки материала. Установлено, что при использовании излучения лазера ГОР-100М, работающего в режиме свободной генерации (длительность импульса – 1,2 мс, плотность потока $\sim 10^6$ Вт/см²), форма поверхности кратера, формирующегося на поверхности расположенного в воде облучаемого образца, принципиально отличается от топографии лунки, которая сформировалась в результате воздействия лазерного импульса с теми же параметрами на аналогичный образец, окруженный воздухом при нормальном давлении (10^5 Па). Показано, что существенное отличие формы поверхности кратера, сформировавшегося в результате воздействия лазерного импульса с одинаковыми параметрами на одинаковые образцы, окруженные воздухом и водой, определяется принципиально различным характером течения плазмы и парогазовой смеси в указанных случаях.

Ключевые слова: импульсное лазерное излучение, скоростная голографическая киносъемка, кратер, парогазовое образование, продукты эрозии, различие течения парогазовой смеси

Для цитирования: Развитие пароплазменного облака при лазерном воздействии на образец, находящийся в жидкости / С. В. Васильев [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 202–211. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-202-211>

Sergey V. Vasiliev, Aleksey Yu. Ivanov, Andrey V. Kopytskiy, Anastasia L. Sitkevich

Yanka Kupala Grodno State University, Grodno, Republic of Belarus

STEAM AND PLASMA BUBBLE EVOLUTION ON LASER TREATING OF A SAMPLE BEING IN LIQUID

Abstract. An object of investigation is pointed - the metal articles being in water and exposed to pulse laser treating. The purpose of research was the investigation of the processes occurring near the metal target treated by pulse laser radiation with flux density $\sim 10^6$ W/cm². The results of the experimental investigation of the pulse laser treating of a led target being in water are described. The process of steam and gas plume generation on the surface of the irradiated metal was investigated experimentally. The features of steam and gas plume form and dimensions evolution on different stages of the process (even after completion of laser treating of the material) were investigated. It is shown that when using GOR-100M operating in free oscillating regime (pulse duration 1.2 ms, laser radiation flux density $\sim 10^6$ W/cm²), the form of a crater developed on the irradiated target surface being in water essentially differs from the topography of the crater developed on the analogical target surrounded by air at normal pressure (10^5 Pa). It is pointed in the conclusions that the substantial difference of the forms of crater surfaces developed as a result of processing of the identical targets being in water or air by laser pulses with the identical parameters, determines by principally different character of plasma and steam and gas mixture flow in the mentioned cases.

Keywords: pulse laser radiation, fast holographic filming, crater, steam and gas plume, erosion products, different steam and gas mixture flow

For citation: Vasiliev S. V., Ivanov A. Yu., Kopytskiy A. V., Sitkevich A. L. Steam and plasma bubble evolution on laser treating of a sample being in liquid. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 202–211 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-202-211>

Введение. За четыре последних десятилетия лазерные и, в частности, лазерно-плазменные технологии нашли широкое применение прежде всего в резке, сварке, сверлении отверстий, упрочнении, распылении, термораскалывании. Следует отметить также лазерные фотохимические процессы и разделение изотопов [1–4].

В наши дни заложены основные представления о механизмах разрушения твердых тел, находящихся в газовой среде, лазерным излучением с плотностью потока $\sim 10^5\text{--}10^{10}$ Вт/см² [5]. Установлено, что конечный результат воздействия лазерного излучения на материал весьма чувствителен к параметрам излучения (длина волны, пространственно-временная структура), а также к состоянию поверхности обрабатываемого вещества и его составу; при этом внутренняя взаимосвязь перечисленных процессов приводит к весьма сложной картине протекания лазерно-плазменной обработки материалов.

Однако реальная картина взаимодействия импульсного лазерного излучения с конденсированными средами не сводится лишь к развитым представлениям и моделям. Еще менее изучены процессы, инициируемые взаимодействием лазерного излучения умеренной интенсивности с веществом, находящимся в жидкости.

Цель данной работы – исследование процессов, протекающих вблизи мишени при воздействии излучения импульсного лазера с плотностью потока $\sim 10^6$ Вт/см² на металлический образец, расположенный в воде.

Методика исследований и экспериментальная установка. Схема экспериментальной установки, которая использовалась при проведении экспериментальных исследований, приведена на рис. 1.

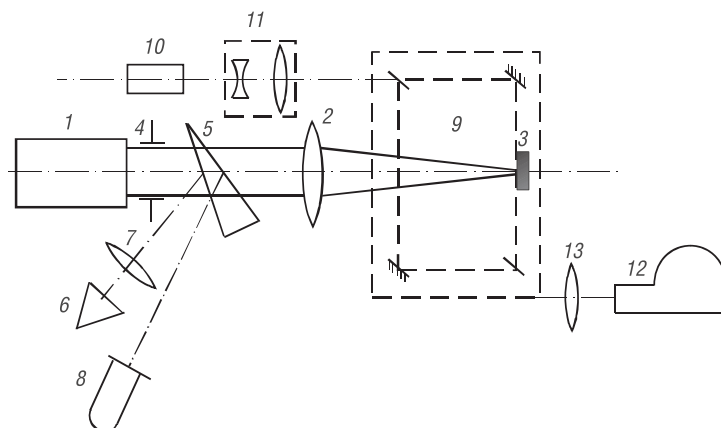


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Experimental setup diagram

Излучение рубинового лазера ГОР-100М 1, работавшего в режиме свободной генерации (длительность импульса $\tau \sim 1,2$ мс, длина волны $\lambda = 0,694$ мкм; временная форма импульса излучения приведена на рис. 2), пройдя через фокусирующую систему 2, направлялось на расположенный в кювете с водой образец 3. В качестве фокусирующих применялись как однолинзовые, так и двухлинзовые системы, которые позволяли строить изображение диафрагмы 4 на поверхности образца 3. Это давало возможность формировать на поверхности мишени однородное пятно фокусировки излучения с резкими границами. Диаметр D полученного таким образом пятна излучения с резкими краями варьировался в ходе экспериментов от 1 до 2 мм. Часть ($\sim 4\%$) лазерного излучения (далее – ЛИ) направлялась передней гранью стеклянного клина 5 в измеритель энергии ИМО-2Н 6, входной зрачок которого располагался в фокальной плоскости линзы 7. Энергия лазерных импульсов E_0 варьировалась в пределах от 5 до 60 Дж. Коаксиальный фотоэлемент ФЭК-14 8, сигнал с которого подавался на вход осциллографа С8-13, применялся для регистрации временной формы лазерного импульса.

Для изучения пространственной и временной эволюции лазерного факела в ходе воздействия ЛИ на образец использовался метод скоростной голографической кино съемки [6].

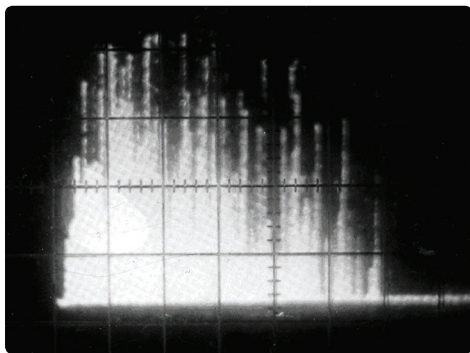


Рис. 2. Осциллограмма импульса излучения лазера GOR-100M. Скорость развертки 200 мкс/дел

Fig. 2. Oscillogram of the GOR-100M laser radiation pulse. Sweep rate 200 μ s/increment

Кювета с облучаемым образцом помещалась в одно из плеч интерферометра Маха–Цендера 9. Интерферометр освещался излучением рубинового лазера 10 ($\lambda = 0,694$ мкм), работавшего в режиме свободной генерации. Длительность импульса излучения зондирующего лазера составляла ~ 400 мкс. Селекция поперечных мод зондирующего лазера осуществлялась диафрагмой, помещенной внутрь резонатора, а продольных – эталоном Фабри–Перо, использовавшимся в качестве выходного зеркала. Зондирующее излучение направлялось в коллиматор 11, который обеспечивал получение параллельного светового пучка диаметром до 3 см, что позволяло наблюдать за развитием пароплазменного облака.

Интерферометр был состыкован со скоростной фоторегистрирующей камерой СФР-1М 12, плоскость фотопленки в которой была сопряжена с меридиональным сечением воздействовавшего на образец лазерного луча

при помощи объектива 13. Скоростная камера работала в режиме лупы времени. Описанная схема позволяла регистрировать развернутые во времени голограммы сфокусированного изображения лазерного факела. Полученные отдельные кадры голограмм обеспечивали временное разрешение 0,8 мкс (время экспозиции одного кадра) и пространственное разрешение по полю объекта ≈ 50 мкм. Дифракционная эффективность голограмм позволяла в стационарных условиях восстанавливать и регистрировать интерференционные и теневые картины исследуемого процесса.

Экспериментальные результаты. Исследования показали, что топография кратера, полученного при воздействии лазерного излучения на погруженный в воду свинцовый образец (рис. 3), существенно отличается от формы поверхности кратера, сформировавшегося в результате воздействия лазерного импульса с теми же параметрами на аналогичный образец, окруженный воздухом при нормальном давлении (10^5 Па, рис. 4). Для изучения формы поверхности образовавшегося на пластине кратера использовался метод проекции полос [7]. Установлено, что в первом случае поверхность кратера пемзообразная, вспененная, макроскопическая лунка практически отсутствует. Во втором случае «внутренняя» зона кратера (лунка) имеет ровную поверхность, буртики и лучи, причина формирования которых описана в [8]. При этом топография кратера (рис. 4, *b*) обусловлена распределением энергии по пятну фокусировки лазерного излучения [8].

На рис. 5 представлены теневые картины, восстановленные с голограмм, которые зарегистрированы описанным методом в различные моменты времени после начала воздействия излучения на вещество. Видно, что у поверхности облучаемого образца формируется парогазовое образование («пузырь»), форма которого первоначально близка к сферической. Образование

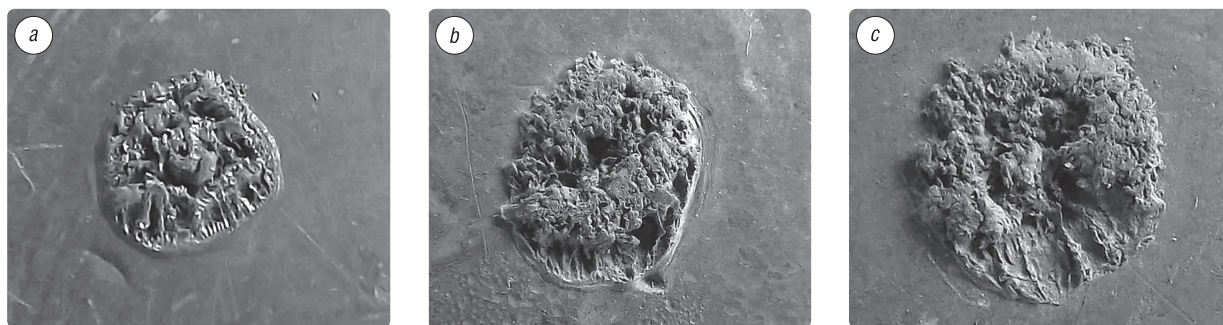


Рис. 3. Фотографии кратеров, полученных при воздействии на свинцовый образец, расположенный в воде, лазерных импульсов с энергией 10 Дж (*a*), 20 Дж (*b*), 40 Дж (*c*)

Fig. 3. Photographs of craters obtained when a lead sample located in water was exposed to laser pulses with an energy of 10 J (*a*), 20 J (*b*), 40 J (*c*)

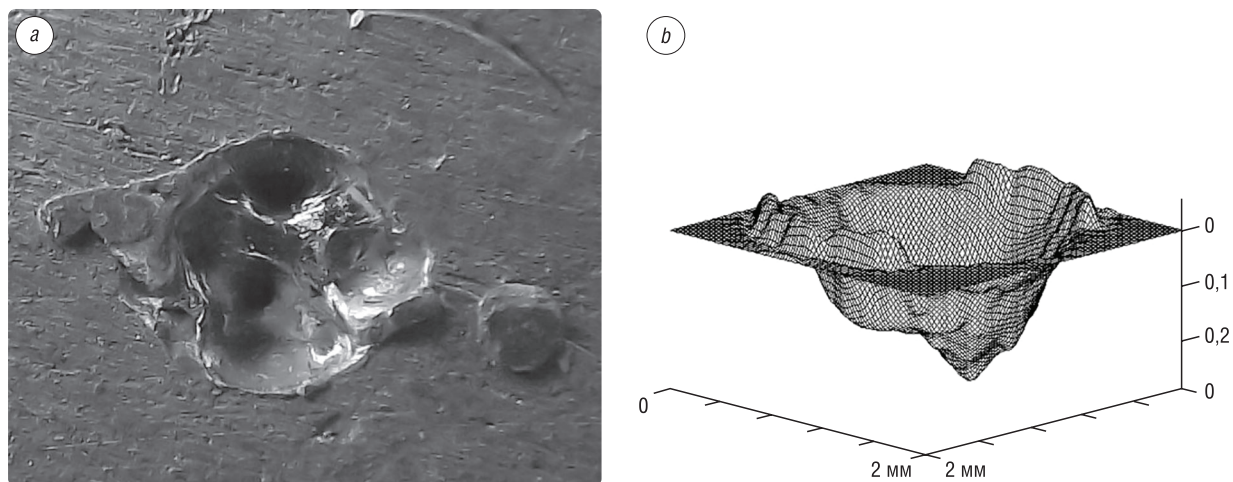


Рис. 4. Фотография кратера, полученного при воздействии лазерного импульса с энергией 40 Дж на расположенный в воздухе свинцовый образец (а), и топограмма кратера (b)

Fig. 4. Photo of a crater obtained by exposure of a lead sample located in air to a laser pulse with an energy of 40 J (a) and a topogram of the crater (b)

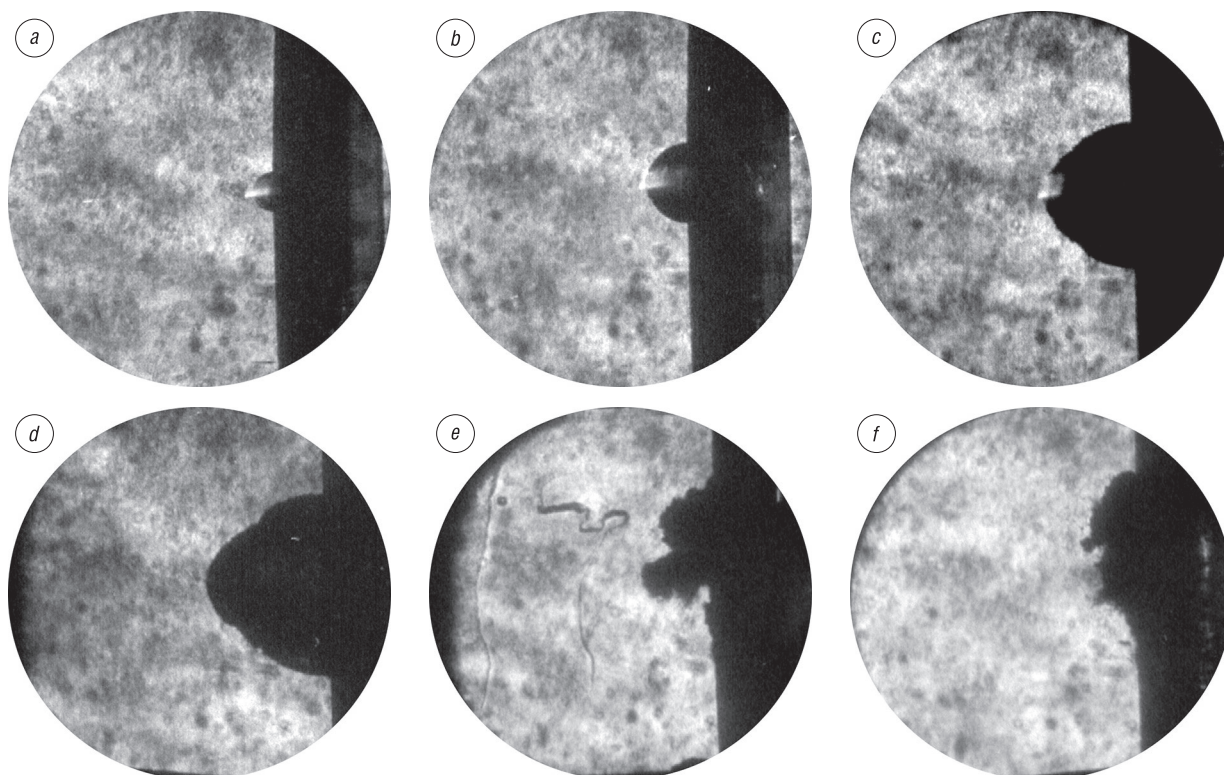


Рис. 5. Теневые картины парогазового образования, зарегистрированные через 10 мкс (а), 50 мкс (b), 500 мкс (c), 1200 мкс (d), 2000 мкс (e), 3000 мкс (f) после начала лазерного воздействия на свинцовый образец. Диаметр поля зрения 4 см

Fig. 5. Shadow patterns of a vapor-gas formation recorded in 10 μs (a), 50 μs (b), 500 μs (c), 1200 μs (d), 2000 μs (e), 3000 μs (f) after the start of laser exposure to a lead sample. Field of view diameter is 4 cm

быстро увеличивается в размерах, особенно на ранних стадиях процесса. В таблице представлены определенные по теневым картинам зависимости радиуса «пузыря» и скорости его роста от времени. Выбор значений времен от начала воздействия лазерного излучения на металлический образец, как будет указано далее, соответствует разделам между стадиями развития «пузыря».

Приблизительно через 1 мс после начала воздействия форма «пузыря» начинает изменяться, на оси лазерного пучка формируется выпуклость. После прекращения воздействия ($\sim 1,2$ мс)

Зависимости определенного по теневым картинам радиуса парогазового образования и скорости его роста от времени

Dependencies of the radius of the vapor-gas formation and the rate of its growth on time, determined from the shadow patterns

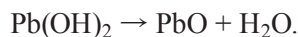
Время, прошедшее от начала воздействия, мкс	10	50	500	1200
Размер «пузыря» вдоль луча лазера, мм	2,2	4,0	7,5	9,5
Диаметр «пузыря», мм	2,3	3,9	6,2	7,1
Скорость перемещения границы «пузыря», м/с	220	45	8	2,5

пропускания 0,69–2,7 мкм) на фотопленке свечения капель не наблюдается. Видна только область горения у поверхности металла. Можно предположить, что капли подсвечиваются излучением лазера. При этом капли диагностируются на всех этапах лазерного воздействия на металлический образец.

После извлечения облученного свинцового образца на его поверхности вблизи кратера (в зоне распространения основания парогазового образования) виден белый налет (порошок), который на воздухе быстро меняет цвет – становится желтовато-бурым. При облучении свинца в воздушном окружении формирования подобных порошков не наблюдается. Очевидно, белый порошок – это гидроксид свинца, которая образовалась в ходе контакта разогретого металла с кислородом и водяным паром:



В дальнейшем $\text{Pb}(\text{OH})_2$ разлагается с образованием оксида свинца:



После проведения эксперимента, как показывают химический анализ и анализ с использованием рентгеновского спектрометра ElvaX, в воде появляется некоторое количество свинца. На рис. 6 представлены рентгенограммы растворов воды, в котором находились образцы при однократном (а) и четырехкратном (б) воздействии на образец лазерных импульсов с энергией 30 Дж. Установлено, что при однократном лазерном воздействии концентрация свинца в воде составляла 0,686 %, при двукратном – 1,582 %, при четырехкратном – 2,328 %.

Однако масса вынесенного металла, даже с учетом массы затвердевших свинцовых капель, собранных на дне кюветы, невелика и существенно уступает выносу массы из лунки при воздействии лазерного излучения на образец, расположенный в воздухе. Об этом же свидетельствует и разница в форме и размерах кратера (см. рис. 4).

Обсуждение результатов. Известно, что при воздействии на образец лазерного излучения с параметрами, соответствующими описанному эксперименту, у поверхности мишени формируется пароплазменное образование (лазерный факел). При лазерном воздействии на металл, окруженный газом при давлении 10^5 Па, плазменное образование может достигать размеров нескольких сантиметров [6]. При воздействии на окруженный водой образец светящаяся область лазерного факела имеет значительно меньший размер – ~ 1 мм; температура на его границе равна ~ 7000 К [9]. Данное различие связано с интенсивным нагреванием и испарением воды, что и приводит к образованию парогазового «пузыря». Содержимое «пузыря» состоит из двух компонент – продуктов эрозии облучаемого образца (в нашем случае – паров свинца) и водяного пара. Уравнения движения этих компонент имеют следующий вид:

уравнения Эйлера для каждой из компонент:

$$\rho_1 \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho_1 (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p, \quad \rho_2 \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \rho_2 (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = -\nabla p;$$

размеры парогазового образования стабилизируются, и только через $\sim 1,5$ мс начинается его медленный распад. Существенно, что при этом не только уменьшаются размеры «пузыря», но и случайным (не повторяющимся от одного эксперимента к другому) образом изменяется его форма. Но даже через 3 мс после начала воздействия лазерного излучения на поверхность металла (то есть через $\sim 1,8$ мс после прекращения воздействия) пароплазменное образование не исчезает.

Следует отметить, что при размещении в схеме экспериментальной установки перед объективом 13 светофильтра КС-17 (область

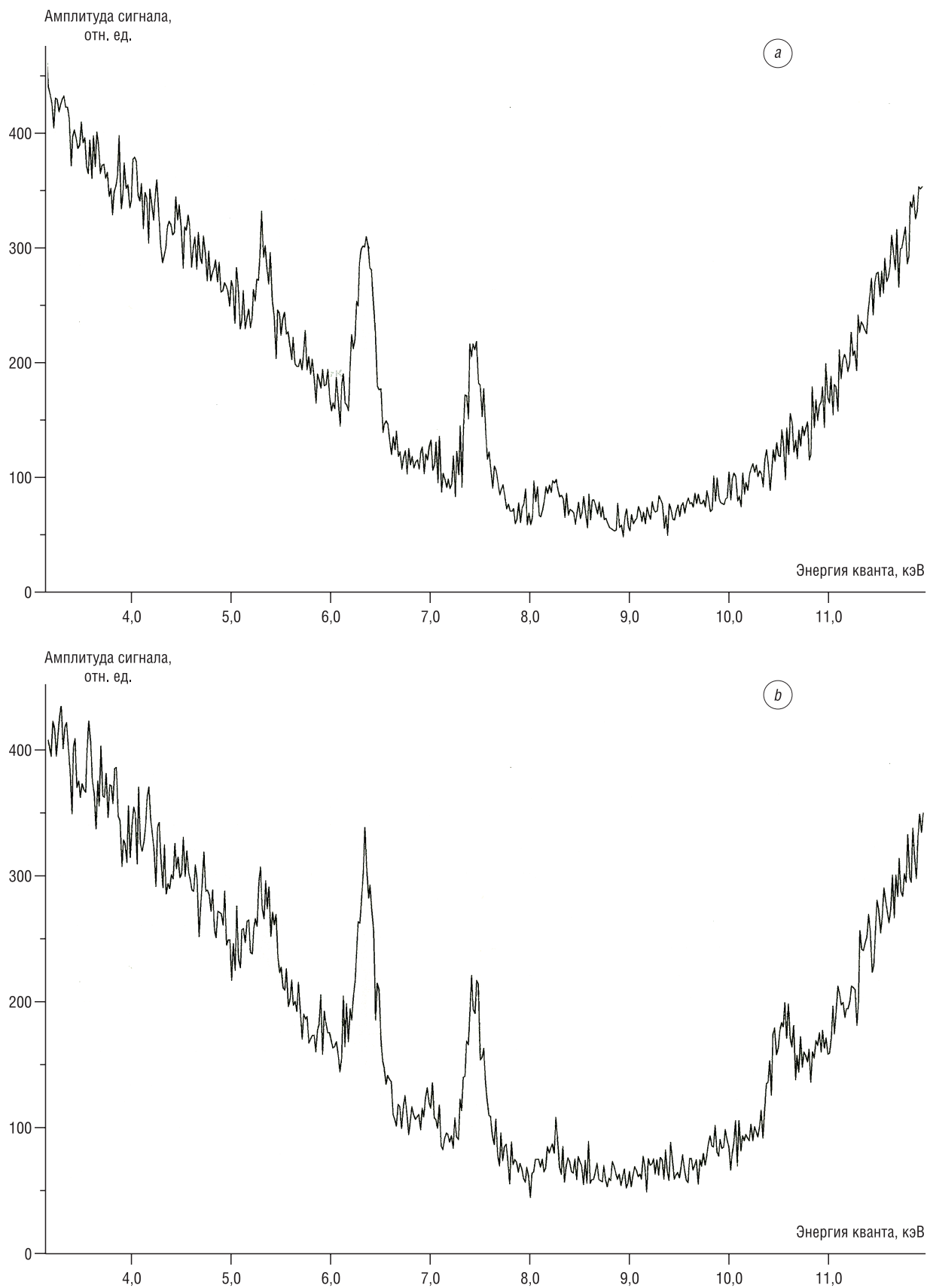


Рис. 6. Рентгенограммы растворов воды, в которых находились образцы при однократном (а) и четырехкратном (б) воздействии на образец лазерных импульсов с энергией 30 Дж

Fig. 6. X-ray diffraction patterns of water solutions in which the samples were located upon single (a) and four-fold exposure of the sample to laser pulses with an energy of 30 J

уравнения непрерывности для каждой из компонент:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 \vec{V}) = A(t) \delta(r - r_0), \quad \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_2 \vec{U}) = B(t) \delta(r - r_b);$$

уравнения состояния для каждой из компонент:

$$p = p_1 + p_2, \quad p_1 = \rho_1 \frac{R_u T}{\mu_1}, \quad p_2 = \rho_2 \frac{R_u T}{\mu_2};$$

уравнения тепломассопереноса для каждой из компонент:

$$\rho_1 c_{p1} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_1 c_{p1} \vec{V} \cdot \nabla T = \operatorname{div}(\alpha_1 \nabla T), \quad \rho_2 c_{p2} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_2 c_{p2} \vec{U} \cdot \nabla T = \operatorname{div}(\alpha_2 \nabla T),$$

которые при сложении дают

$$(\rho_1 c_{p1} + \rho_2 c_{p2}) \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_1 c_{p1} \vec{V} + \rho_2 c_{p2} \vec{U}) \cdot \nabla T = \operatorname{div}((\alpha_1 + \alpha_2) \nabla T).$$

Здесь ρ_1 – плотность газа продуктов абляции, ρ_2 – плотность водяного пара, \vec{V} – скорость течения газа продуктов абляции, \vec{U} – скорость течения водяного пара, $A(t)$ – плотность мощности источника продуктов абляции (временная форма повторяет форму воздействующего импульса), $r = r_0$ – уравнение границы плазменного образования у поверхности мишени, $B(t)$ – плотность мощности источника водяного пара, $r = r_b$ – уравнение границы парогазового пузыря, p_1 – парциальное давление газа продуктов абляции, p_2 – парциальное давление водяного пара, T – температура системы, μ_1 – молярная масса продуктов эрозии, μ_2 – молярная масса водяного пара, R_u – универсальная газовая постоянная, c_{p1} – теплоемкость при постоянном давлении продуктов эрозии, c_{p2} – теплоемкость при постоянном давлении водяного пара, α_1 – коэффициент теплопроводности продуктов эрозии, α_2 – коэффициент теплопроводности водяного пара, h – удельная теплота парообразования воды, p_a – атмосферное давление, M – масса воды в кювете, S_b – площадь поверхности парогазового пузыря, a – ускорение поверхности парогазового пузыря,

$B(t) = D \frac{(\alpha_1 + \alpha_2) |\nabla T|}{h} \Big|_{r=r_b}$, D – коэффициент, определяющийся исходя из массы водяного пара в момент максимальности размеров пузыря, определяемого по теневым картинам. Значения r_b в различные моменты времени определялись по теневым картинам, подобным приведенным на рис. 5 (как уже указано, они регистрировались через каждые 0,8 мкс). Значения r_0 определялись как радиус светящейся области у поверхности мишени, зарегистрированной при размещении в схеме экспериментальной установки перед объективом I3 светофильтра КС-17.

Решая данную систему уравнений с граничными условиями: $T|r = r_0 = 7000$ К, $T|r = r_b = 373$ К, $V_n|z = 0 = U_n|z = 0 = 0$, $(p - p_a)|r = r_b = a \cdot M/S_b$, получим следующий характер движения парогазовой смеси.

Поток горячих продуктов эрозии эмитируется небольшим плазменным образованием (поперечные размеры потока не превышают диаметра пятна фокусировки излучения) навстречу лазерному лучу. На первой стадии ($t < 10$ мкс) ввиду высоких плотности и температуры продуктов эрозии ($T|r = r_0 = 7000$ К) разлет плазмы подобен наблюдаемому при воздействии лазерного излучения на образец, расположенный в воздухе. Движение продуктов эрозии сверхзвуковое и практически одномерное (вещество радиально разлетается от центра пятна фокусировки излучения). При этом подукты эрозии охлаждаются, испаряя воду. Скорость перемещения границы пароплазменного «пузыря» \vec{U}_b также сверхзвуковая. Из зоны эрозии наблюдается интенсивный вылет капель свинца в конденсированном состоянии.

На второй стадии процесса ($10 \text{ мкс} < t < 50 \text{ мкс}$) движение продуктов эрозии по-прежнему сверхзвуковое. Однако на этой стадии масса водяного пара уже значительно превышает массу продуктов эрозии, содержащихся в «пузыре». Скорость перемещения границы пароплазменного «пузыря» \vec{U}_b становится дозвуковой, скорость течения пара \vec{U} также дозвуковая и существенно меньше \vec{U}_b , но среднее значение $|\vec{U}|$ постепенно увеличивается. Движение содержимого «пузыря» по-прежнему практически одномерное. Часть испаренных продуктов эрозии выходит за пределы «пузыря» и образует водяной гель.

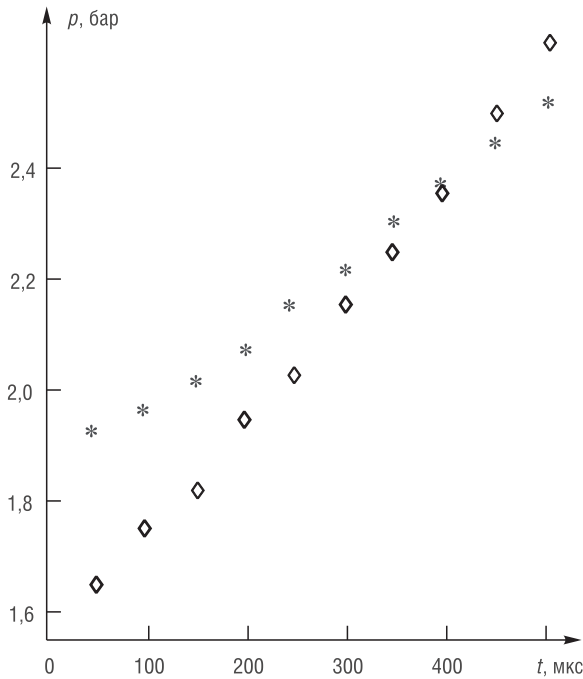


Рис. 7. Зависимости парциального давления газа продуктов абляции (*) и водяного пара (◊) от времени
 Fig. 7. Dependences of the partial pressure of the gas of ablation products (*) and water vapor (◊) on time

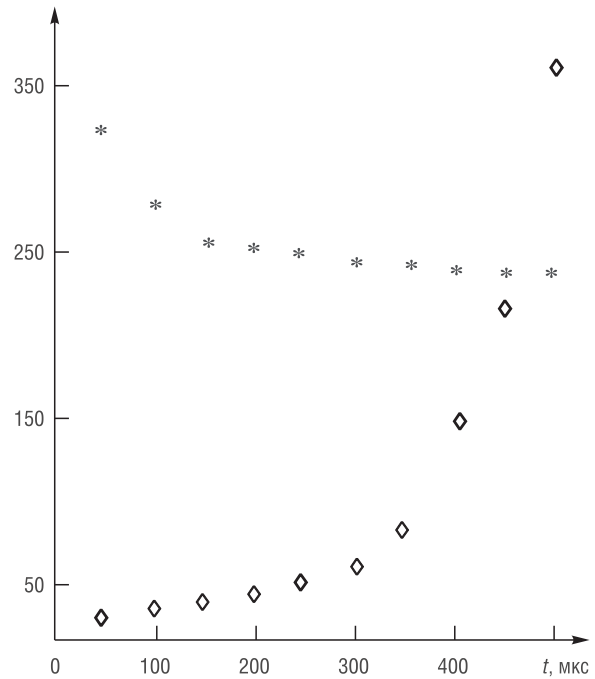


Рис. 8. Зависимости скорости течения газа продуктов абляции (*) и водяного пара (◊) на расстоянии $r = \Delta r/2$ от поверхности парогазового образования от времени
 Fig. 8. Dependences of the flow rate of the gas of ablation products (*) and water vapor (◊) at a distance $r = \Delta r/2$ from the surface of the vapor-gas formation on time

На третьей стадии процесса ($50 \text{ мкс} < t < 500 \text{ мкс}$) скорости всех компонент, наполняющих «пузырь», становятся дозвуковыми. Их перемещение по-прежнему практически одномерное. Система уравнений движения компонент системы допускает линеаризацию.

На рис. 7 и 8 приведены зависимости от времени парциальных давлений газа продуктов абляции p_1 и водяного пара p_2 и скоростей течения газа продуктов абляции \vec{V} и водяного пара \vec{U} соответственно на расстоянии $r = \Delta r/2$ от поверхности «пузыря». Существенно, что в конце рассматриваемой стадии процесса течение водяного пара становится сверхзвуковым, и, следовательно, линеаризация уравнений движения компонент системы становится недопустимой.

На четвертой стадии процесса ($t > 500 \text{ мкс}$) течение водяного пара перестает быть одномерным. Достигнув границы «пузыря», поток водяного пара перемещается по касательной парогазового образования к мишени, достигает ее, идет вдоль мишени к центру вплоть до плазменного образования, нагревается и направляется навстречу лучу лазера вместе с продуктами эрозии. Таким образом, поток водяного пара, идущий к центру кратера, не дает вытекать жидкому металлу из лунки и вспенивает его.

Следует отметить, что при действии на тот же образец одиночного пучка лазера ГОР-100М (режим модулированной добротности) длительностью $\sim 1 \text{ мкс}$ с энергией $\sim 1,5 \text{ Дж}$ поверхность кратера оставалась гладкой (рис. 9), подобной представленной на рис. 4, а, но сам кратер был гораздо менее глубоким. При этом в ходе развития парогазового образования наблюдалась только

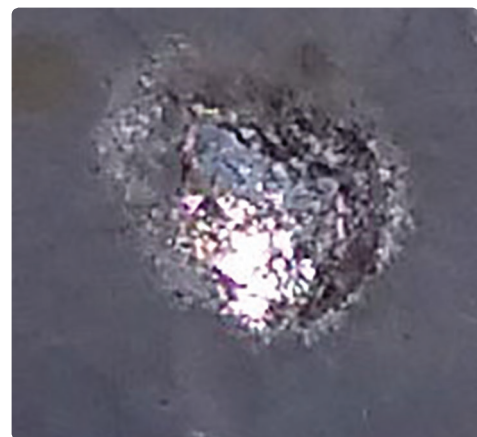


Рис. 9. Фотография кратера, полученного при воздействии на свинцовый образец, расположенный в воде, одиночного лазерного импульса с энергией 1 Дж

Fig. 9. Photo of a crater obtained by exposing a lead sample located in water to a single laser pulse with an energy of 1 J

первая стадия. После завершения роста «пузыря» его размеры медленно уменьшались без существенного изменения формы.

Следовательно, «вспененность» поверхности кратера, которая наблюдалась при воздействии на поверхность металлического образца излучения лазера ГОР-100М, работавшего в режиме свободной генерации (длительность импульса $\tau \sim 1,2$ мс), появляется только после нарушения одномерности (радиальности) течения пара.

Кроме того, вероятно, на четвертой стадии процесса ($t \geq 500$ мкс) в зоне соприкосновения «прямого» и «обратного» течений пара образуются вихри, которые заполняют почти весь объем «пузыря». Этим объясняется случайный (не повторяющийся от одного эксперимента к другому) характер распада парогазового образования.

Заключение. В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что при использовании излучения лазера ГОР-100М, работающего в режиме свободной генерации (длительность импульса – 1,2 мс, плотность потока $\sim 10^6$ Вт/см²), форма поверхности кратера, формирующегося на поверхности облучаемого образца, расположенного в воде, принципиально отличается от топографии лунки, сформировавшейся в результате воздействия лазерного импульса с теми же параметрами на аналогичный образец, окруженный воздухом при нормальном давлении (10^5 Па). Показано, что существенное отличие формы поверхности кратера, который сформировался в результате воздействия лазерного импульса с одинаковыми параметрами на одинаковые образцы, окруженные воздухом и водой, определяется принципиально различным характером течения плазмы и парогазовой смеси в указанных случаях.

Полученные результаты могут быть применены на промышленных предприятиях и в организациях, использующих лазерную обработку материалов.

Список использованных источников

1. Гладуш, Г.Г. Особенности сварки металлов излучением импульсно-периодического Nd:YAG-лазера малой мощности / Г.Г. Гладуш, А. Ф. Глова, С. В. Дробязко // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36, № 11. – С. 1080–1082.
2. Лазерная прошивка сверхглубоких микронных отверстий в различных материалах при программируемом управлении параметрами лазерной генерации / Т.Т. Басиев [и др.] // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37, № 1. – С. 99–102.
3. Влияние длительности импульса на графитизацию алмаза в процессе лазерной абляции / В.В. Кононенко [и др.] // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 3. – С. 252–256.
4. Вейко, В.П. Лазерная аморфизация стеклокерамик: основные закономерности и новые возможности изготовления микрооптических элементов / В.П. Вейко, К.К. Киеу // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37, № 1. – С. 92–98.
5. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А.М. Прохоров [и др.]. – М.: Наука, 1982. – 537 с.
6. Барихин, Б.А. Скоростная голографическая киносъемка лазерной плазмы / Б.А. Барихин, А.Ю. Иванов, В.И. Недолугов // Квантовая электроника. – 1990. – Т. 17, № 11. – С. 1477–1480.
7. Вест, Ч. Голографическая интерферометрия / Ч. Вест. – М.: Мир, 1982. – 504 с.
8. Особенности формирования кратера на поверхности металла, облучаемого повторяющимися лазерными импульсами / Н.А. Босак [и др.] // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 27, № 1. – С. 69–72.
9. Spectroscopic characterization of laser ablation in liquids / A. Butsen [et al.] // VII International conference “Plasma physics and plasma technology” (Minsk, September 17–21, 2012): contributed papers: in 2 vol. – Minsk: Kovcheg, 2012. – Vol. 1. – P. 220–223.

References

1. Gladush G. G., Glova A. F., Drobiasko S. V. Peculiarities of metals welding by radiation of pulse-periodical Nd:YAG-laser of small power. *Quantum Electronics*, 2006, vol. 36, no. 11, pp. 1080–1082. <https://doi.org/10.1070/qe2006v-036n11abeh013260>
2. Basiev T. T., Gavrilov A. V., Osiko V. V., Smetanin S. N., Fedin A. V. Laser broaching of super-deep micron apertures in different materials on programed AAA of laser generatio parameters. *Quantum Electronics*, 2007, vol. 37, no. 1, pp. 99–102. <https://doi.org/10.1070/qe2007v037n01abeh013310>
3. Kononenko V. V., Kononenko T. V., Pimenov S. M., Sin’avskiy M. N., Konov V. I., Dausinger F. Pulse duration influence on diamond graphitation during laser ablation process. *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, no. 3, pp. 252–256. <https://doi.org/10.1070/qe2005v035n03abeh002900>
4. Veiko V. P., Kieu K. K. Laser amorphisation of glass-ceramics: main regularities and new possibilities of micro-optical elements production. *Quantum Electronics*, 2007, vol. 37, no. 1, pp. 92–98. <https://doi.org/10.1070/qe2007v037n01abeh008992>
5. Prohorov F. M., Konov V. I., Ursu I., Mihalesku I. N. *Interaction of Laser Radiation with Metals*. Moscow, Nauka Publ., 1982. 537 p. (in Russian).

6. Barihin B. A., Ivanov A. Yu., Nedolugov V. I. Fast holographic filming of laser plasma. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1990, vol. 20, no. 11, pp. 1386–1388. <https://doi.org/10.1070/qe1990v020n11abeh007538>

7. Vest Ch. *Holographic Interferometry*. Moscow, Mir Publ., 1982. 504 p. (in Russian).

8. Bosak N. A., Vasiliev S. V., Ivanov A. Yu., Min'ko L. Ya., Nedolugov V. I., Chumakov A. N. Characteristic features of the formation of a crater on the surface of a metal irradiated with repeated laser pulses. *Quantum Electronics*, 1999, vol. 29, no. 4, pp. 351–354. <https://doi.org/10.1070/qe1999v029n04abeh001486>

9. Butsen A., Burakov V., Kiris V., Tarasenko N. Spectroscopic characterization of laser ablation in liquids. *VII International Conference "Plasma physics and plasma technology" (Minsk, September 17–21, 2012). Contributed papers. Volume 1*. Minsk, Kovcheg Publ., 2012, pp. 220–223.

Информация об авторах

Васильев Сергей Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электроники, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы (ул. Ожешко, 22, 230023, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: s.v.vasiliev@inbox.ru

Иванов Алексей Юрьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики и теплотехники, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы (ул. Ожешко, 22, 230023, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: ion_ne@mail.ru

Копыцкий Андрей Витальевич – магистр естественных наук, преподаватель кафедры медицинской и биологической физики, Гродненский государственный медицинский университет (ул. Горького, 70, 230029, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: Andrey_Cop@tut.by

Ситкевич Анастасия Леонидовна – магистр физико-математических наук, аспирант физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы (ул. Ожешко, 22, 230023, Гродно, Республика Беларусь). E-mail: girl-physicist@mail.ru

Information about the authors

Sergey V. Vasiliev – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electronics, Yanka Kupala State University of Grodno (22, Ozheshko Str., 230023, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: s.v.vasiliev@inbox.ru

Aleksey Yu. Ivanov – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Theoretical Physics and Heat Engineering, Yanka Kupala State University of Grodno (22, Ozheshko Str., 230023, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: ion_ne@mail.ru

Andrey V. Kopytskiy – Master of Sciences, Lecturer of the Department of Medical and Biological Physics, Grodno State Medical University (70, Gorky Str., 230029, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: Andrey_Cop@tut.by

Anastasiya L. Sitkevich – Master of Physics and Mathematics, Postgraduate Student of the Faculty of Physics and Technology, Yanka Kupala State University of Grodno (22, Ozheshko Str., 230023, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: girl-physicist@mail.ru