

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

BRIEF PAPERS

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-165-169

УДК 621.373.826:537.312.5:681.7.068

**Исследование влияния формы выходного торца оптического волокна
на гидроакустические процессы в жидкости, стимулируемые
микросекундными импульсами излучения Yb,Er:Glass-лазера**

Раед Нассер¹, Сергей Николаевич Смирнов²✉

^{1,2} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ raedrr9898@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7557-1777>

² sns@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-1891-9122>

Аннотация

Представлены результаты исследования гидроакустических процессов, возбуждаемых в объеме дистиллированной воды мощными микросекундными импульсами излучения Yb,Er:Glass-лазера, доставленными через оптические волокна с двумя различными формами выходного торца. Выполнено сравнение объема парогазовой полости, образовавшейся в жидкости, и перепадов давления, возникающих в момент действия лазерного импульса и в фазе «коллапс-возобновление» парогазовой полости. Полученные результаты полезны для развития технологий лазерных эндохирургических вмешательств, требующих эффективного разрушения патологических биотканей, например, лазерной экстракции катаракты.

Ключевые слова

Yb,Er:Glass-лазер, микросекундные импульсы, парогазовая полость, форма выходного торца волокна

Ссылка для цитирования: Нассер Р., Смирнов С.Н. Исследование влияния формы выходного торца оптического волокна на гидроакустические процессы в жидкости, стимулируемые микросекундными импульсами излучения Yb,Er:Glass-лазера // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 1. С. 165–169. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-165-169

**Study of the influence of the optical fiber output end shape on hydroacoustic
processes in a liquid stimulated by microsecond pulses of Yb,Er:Glass laser
radiation**

Raed Nasser¹, Sergey N. Smirnov²✉

^{1,2} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ raedrr9898@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7557-1777>

² sns@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-1891-9122>

Abstract

The results of a study of hydroacoustic processes stimulated in a volume of distilled water by powerful microsecond pulses of Yb,Er:Glass laser radiation delivered through optical fibers with two different shapes of the output end are presented. A comparison of the volume of the steam-gas cavity formed in the liquid and the pressure drops that occur at the moment of the laser pulse action and in the “collapse-rebound” phase of the vapor-gas cavity is presented. The results obtained are useful for the development of technologies for laser endosurgical interventions that require effective destruction of pathological biological tissues, for example, laser cataract extraction.

Keywords

Yb,Er:Glass laser, microsecond pulses, steam-gas cavity, shape of the fiber output end

For citation: Nasser R., Smirnov S.N. Study of the influence of the optical fiber output end shape on hydroacoustic processes in a liquid stimulated by microsecond pulses of Yb,Er:Glass laser radiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 165–169 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-165-169

© Нассер Р., Смирнов С.Н., 2024

Излучение Yb,Er:Glass-лазера с длиной волны 1,54 мкм является безопасным для сетчатки глаза и широко используется в дальнометрии, локации, а также в медицине. Благодаря сильному поглощению в воде и эффективной передаче через кварцевые оптические волокна, данное излучение успешно применяется в офтальмологии для проведения лазерной термокератопластики [1] и экстракции катаракты [2, 3]. В последнем случае обработка биоткани происходит в жидкой среде, а доставленные в переднюю камеру глаза через оптическое волокно лазерные импульсы стимулируют гидроакустические процессы, в том числе кавитацию, т. е. возникновение парогазовых полостей в жидкости. Эти процессы оказывают значительное влияние на эффективность разрушения катарактального хрусталика [2–4].

Параметры парогазовой полости, образующейся в результате взаимодействия лазерного излучения с водой, сильно зависят от длительности импульса, его временной структуры [5] и от объемной плотности поглощенной энергии [6], которая, в свою очередь, определяется формой выходного торца оптического волокна доставки излучения. При изменении формы выходного торца волокна изменяется распределение выходного излучения, таким образом, для различных применений разрабатываются оптические волокна со специальной оптимальной формой выходного торца [7–10].

В настоящей работе рассмотрены гидроакустические процессы, стимулируемые в объеме дистиллированной воды одиночными микросекундными импульсами излучения Yb,Er:Glass-лазера, доставленными через оптические волокна со ступенчатым профилем

показателя преломления с двумя различными формами выходного торца — стандартной плоской (торец 1) и специальной (торец 2). Стандартное кварц-кварцевое волокно имело диаметр сердцевин/оболочки 470/500 мкм и числовую апертуру 0,18 (рис. 1, *a*). Торец 1 был подготовлен путем скалывания при помощи портативного скалывателя оптического волокна «SKL-6C» («Comptech Trading Co., Ltd.», Китай), обеспечивающего угол скола $90 \pm 0,5^\circ$. Отличительная особенность данного метода подготовки торца — наличие дефекта в виде небольшого острого выступа, который не выходит за пределы оболочки волокна и мал по сравнению с его апертурой. Отметим, что данный дефект не оказал существенного влияния на распределение интенсивности на выходе волокна по сравнению с полированным плоским торцом без дефектов, однако имел большую лучевую стойкость. Торец 2 (рис. 1, *b*) получен путем шлифовки и полировки стандартного оптического волокна одинаково с двух противоположных сторон (Wedge-Shaped Fiber) при помощи полировальной машины «ULTRAPOL Fiberlab Module System» («ULTRA TEC», США). Предварительно выполнено моделирование распространения излучения из волокна в прикладном программном пакете «TracePro 7.0» («Lambda Research Corp.», США). В результате установлено, что при угле раствора 65° обеспечивается высокая концентрация излучения в области под торцом 2 (рис. 1, *b*). Стоит отметить, что несимметричность изготовленного торца 2, заметная на рис. 1, *d*, не приводит к значительному изменению распределения интенсивности излучения на выходе волокна по отношению к идеальному симметричному торцу с

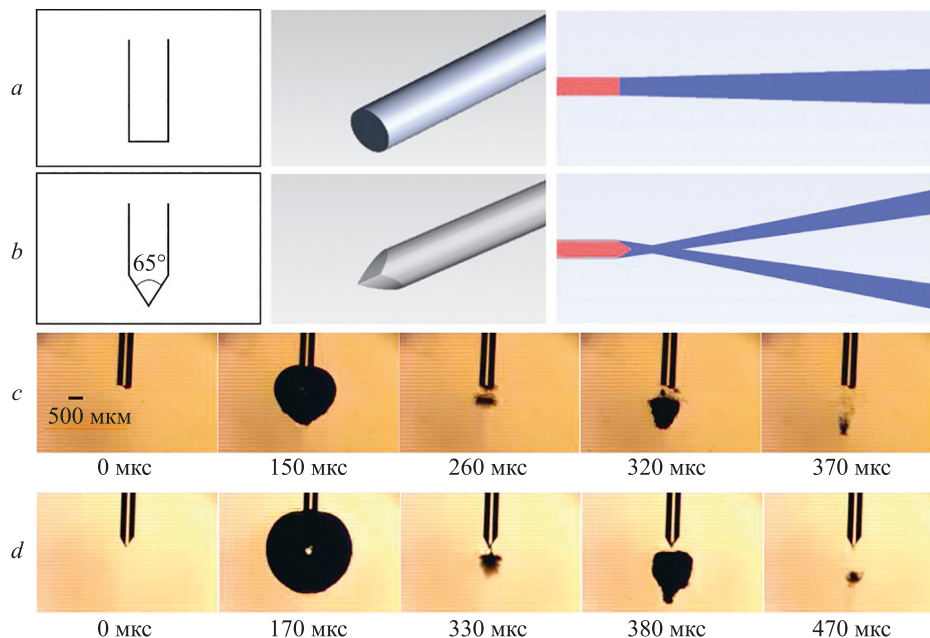


Рис. 1. Сравнения распространения выходного пучка в воде (результат моделирования) при использовании волокна с выходными торцами 1 (*a*) и 2 (*b*) для доставки излучения и формы парогазовой полости в различные моменты времени после действия лазерного импульса, доставленного через волокно с выходными торцами 1 (*c*) и 2 (*d*)

Fig. 1. Comparison of the propagation of the output beam in water (simulation result) when using a fiber with output end 1 (*a*) and end 2 (*b*) for radiation delivery. Comparison of the steam-gas cavity shape at different times after the action of a laser pulse delivered through the fiber by output end 1 (*c*) and end 2 (*d*)

углом раствора 65° , и, соответственно, существенно не изменяет объемную плотность поглощенного в воде излучения.

Цель работы — изучение и сравнение динамики парогазовой полости, а также акустического сигнала при возбуждении гидроакустических процессов с использованием для доставки излучения оптических волокон с двумя различными формами выходного торца.

Импульсы излучения доставлялись в объем дистиллированной воды на глубину 30 ± 1 мм, а расстояние от торца волокна до стенок кюветы превышало 50 мм. Динамика формы и размеров формируемой парогазовой полости регистрировалась высокоскоростной камерой «FASTCAM SA4 RV» («Photron», Япония), скорость записи составила 10^5 кадр/с. Акустический сигнал, сопровождающий взаимодействие импульсов излучения с водой, регистрировался гидрофоном «HGL-0200» («Onda», США), установленным на рас-

стоянии 2,4 мм от выходного торца волокна под углом 45° к его нормали. Гидрофон фиксировал первичный перепад давления (ΔP_1), который возникал в момент действия лазерного импульса и был связан с термоупругим расширением жидкости, а также вторичный перепад давления (ΔP_2), связанный с процессом «коллапсом-возобновление» парогазовой полости.

На рис. 1, с представлены фотографии парогазовых полостей, отражающие характерные размеры парогазовой полости, возникающей после воздействия на жидкость одного лазерного импульса с энергией 85 ± 5 мДж, доставленного через волокно с торцом 1. Формирование полости происходит после действия лазерного импульса, полость достигает своего максимального размера на 150 ± 10 мкс, затем на 260 ± 10 мкс происходит ее «коллапс», после чего полость осциллирует еще два раза. В работе [10] подробно описана динамика парогазовой полости при Yb,Er:Glass-лазерном

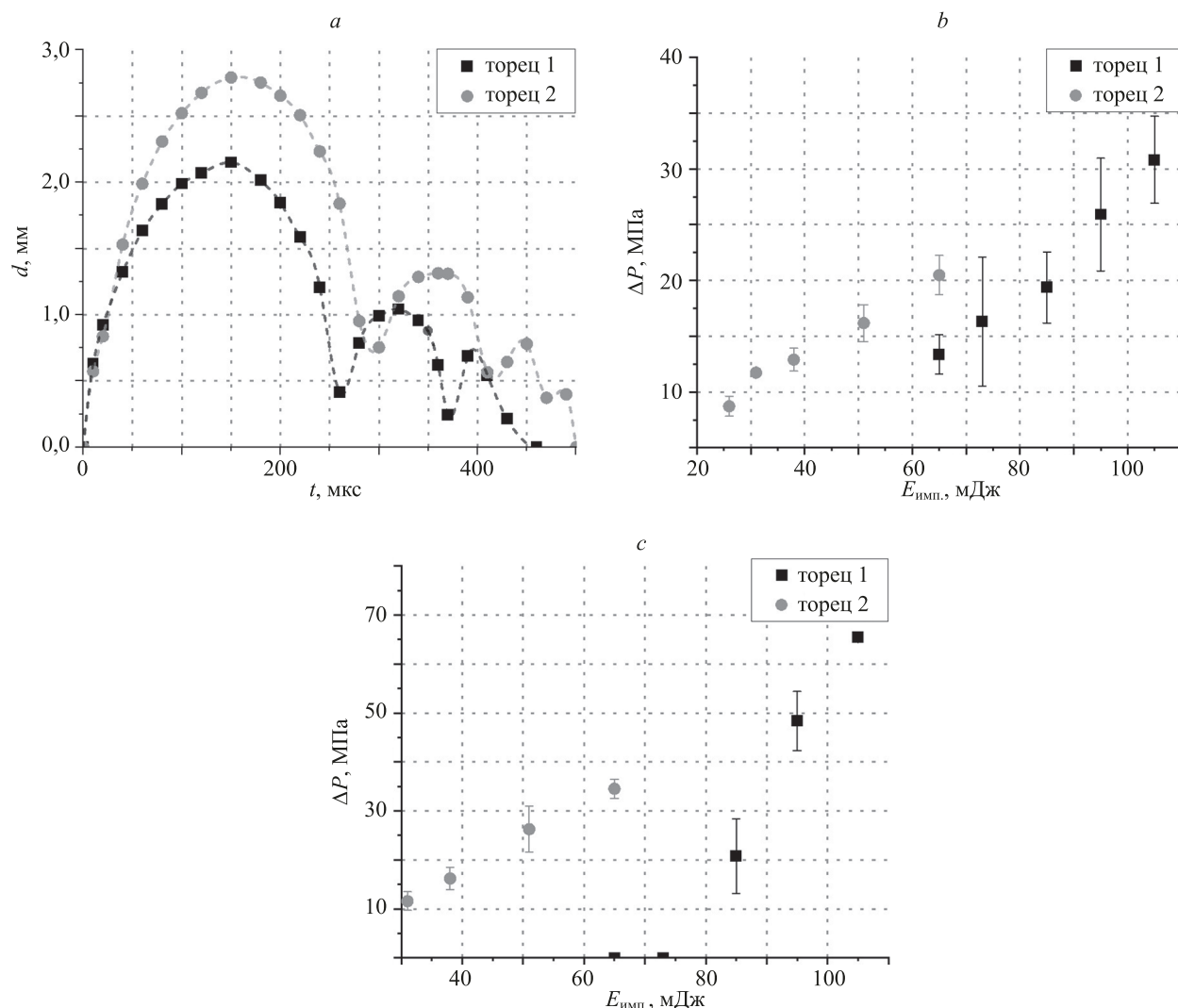


Рис. 2. Зависимости диаметра пузыря (d) от времени (t) при воздействии одиночного лазерного импульса, доставленного через оптическое волокно с разной формой выходного торца (a); первичного (ΔP_1) (b) и вторичного (ΔP_2) (c) перепадов давления от энергии лазерного импульса ($E_{\text{имп.}}$).

Fig. 2. Dependence of the bubble diameter (d) on time (t) when irradiating water with a single laser pulse delivered through an optical fiber with a different shape of the output end (a). Dependence of the primary (ΔP_1 , thermoelastic expansion of water) (b) and secondary (ΔP_2 , collapse-rebound of steam-gas cavity) (c) pressure drop on the laser pulse energy ($E_{\text{имп.}}$).

Таблица. Сравнение максимальных значений диаметра и объема пузыря, стимулируемого при доставке лазерного импульса через волокна с разными формами выходного торца

Table. Comparison of the maximum diameter and maximum volume of steam-gas cavity stimulated when delivering a laser pulse through fibers with different output end shapes

Форма торца	$E_{\text{имп.}}$, мДж	$d_{\text{макс.}}$, мм	$V_{\text{макс.}}$, мм ³	$\Delta P_{1 \text{ макс.}}$, МПа	$\Delta P_{2 \text{ макс.}}$, МПа
Торец 1	85 ± 2	2,150	6,96	18 ± 5	20 ± 7
Торец 2	65 ± 2	2,791	12,12	20 ± 3	34 ± 2

возбуждении. На рис. 1, d представлены фотографии парогазовых полостей, отражающие характерные размеры парогазовой полости, возникающей после воздействия на жидкость одного лазерного импульса с энергией 65 ± 5 мДж, доставленного через волокно с торцом 2. В этом случае формирование полости также происходит после действия лазерного импульса, полость достигает своего максимального размера на 150 ± 10 мкс, затем на 300 ± 10 мкс происходит ее «коллапс», после чего полость осциллирует еще три раза. Полученные в результате обработки кадров высокоскоростной съемки графики изменения вертикального размера парогазовой полости представлены на рис. 2, a .

В таблице представлено сравнение максимальных значений диаметра $d_{\text{макс.}}$ и объема пузыря $V_{\text{макс.}}$ (формируемого лазерным импульсом при его доставке через волокно с рассматриваемыми формами выходного торца оптического волокна), а также амплитуд перепадов давления $\Delta P_{1 \text{ макс.}}$ и $\Delta P_{2 \text{ макс.}}$.

Видно, что при использовании оптического волокна с выходным торцом 2, несмотря на меньшую на 20 мДж

(в 1,31 раза) энергию лазерного импульса $E_{\text{имп.}}$, максимальный объем парогазовой полости $V_{\text{макс.}}$ более чем в 1,74 раза больше, значение первичного перепада давления $\Delta P_{1 \text{ макс.}}$ сопоставимо, а вторичного $\Delta P_{2 \text{ макс.}}$ — на 14 МПа (в 1,7 раза) больше. Полученные результаты могут быть полезны для развития технологий лазерных эндохирургических вмешательств, требующих эффективного разрушения патологических биотканей, например, лазерной экстракции катаракты, поскольку установлено, что применение для доставки излучения специального оптического волокна позволяет уменьшить суммарную энергетическую нагрузку на биообъект при проведении операции.

Отметим, что торец 2 имел острую грань, поэтому его механическая прочность была меньше, чем у торца 1. Вследствие этого, максимальная энергия на выходе волокна с торцом 2 была ограничена. В дальнейшем необходимо проведение исследования, направленного на повышение механической прочности выходных торцов специальных оптических волокон.

Литература

- Куликова И.Л., Паштаев Н.П. Особенности энергетического воздействия на роговицу Glass-Yb:Er лазера с длиной волны 1,54 мкм // Вестник Оренбургского государственного университета. 2007. № 5(78). С. 132–135.
- Belikov A.V., Smirnov S.N., Kopaev S.Yu., Nemsitsveridze M.N., Batov Yu.N., Gubin A.B., Pirozhkov Yu.B. Use of bursts of 1.54- μ m microsecond laser pulses for cataract destruction // Quantum Electronics. 2021. V. 51. N 1. P. 2. <https://doi.org/10.1070/qel17473>
- Belikov A.V., Smirnov S.N., Batov Yu.N., Gubin A.B., Pirozhkov Yu.B., Boiko E.V., Nemsitsveridze M.N. In vitro study of cataract extraction by bursts of microsecond 1.54- μ m laser pulses // Quantum Electronics. 2022. V. 52. N 1. P. 69–77. <https://doi.org/10.1070/qel17959>
- Беликов А.В., Гагарский С.В., Сергеев А.Н., Смирнов С.Н., Загорюлько А.М. Исследование акустического сигнала при лазерной гидроакустической обработке биоткани микросекундными импульсами излучения лазера на иттербий-эрбиевом стекле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. № 6. С. 939–945. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-6-939-945>
- Asshauer T., Rink K., Delacrétaz G. Acoustic transient generation by holmium-laser-induced cavitation bubbles // Journal of Applied Physics. 1994. V. 76. N 9. P. 5007–5013. <https://doi.org/10.1063/1.357212>
- Gregorčič P., Jezeršek M., Možina J. Optodynamic energy-conversion efficiency during an Er:YAG-laser-pulse delivery into a liquid through different fiber-tip geometries // Journal of Biomedical Optics. 2012. V. 17. N 7. P. 0750061. <https://doi.org/10.1117/1.jbo.17.7.075006>
- Lippert B.M., Teymoortash A., Folz B.J., Werner J.A. Coagulation and temperature distribution in Nd: YAG interstitial laser thermotherapy: An in vitro animal study // Lasers in Medical Science. 2003. V. 18. N 1. P. 19–24. <https://doi.org/10.1007/s10103-002-0246-2>

References

- Kulikova I.L., Pashtaev N.P. Peculiarities of energy influence of glass-Yb:Er laser with wave length 1,54 mkm on cornea. *Vestnik of the Orenburg State University*, 2007, no. 5(78), pp. 132–135. (in Russian)
- Belikov A.V., Smirnov S.N., Kopaev S.Yu., Nemsitsveridze M.N., Batov Yu.N., Gubin A.B., Pirozhkov Yu.B. Use of bursts of 1.54- μ m microsecond laser pulses for cataract destruction. *Quantum Electronics*, 2021, vol. 51, no. 1, pp. 2. <https://doi.org/10.1070/qel17473>
- Belikov A.V., Smirnov S.N., Batov Yu.N., Gubin A.B., Pirozhkov Yu.B., Boiko E.V., Nemsitsveridze M.N. In vitro study of cataract extraction by bursts of microsecond 1.54- μ m laser pulses. *Quantum Electronics*, 2022, vol. 52, no. 1, pp. 69–77. <https://doi.org/10.1070/qel17959>
- Belikov A.V., Gagarsky S.V., Sergeev A.N., Smirnov S.N., Zagorulko A.M. Study of acoustic signal during laser hydroacoustic processing of biological tissue by microsecond pulses of ytterbium-erbium glass laser radiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 939–945. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-6-939-945>
- Asshauer T., Rink K., Delacrétaz G. Acoustic transient generation by holmium-laser-induced cavitation bubbles. *Journal of Applied Physics*, 1994, vol. 76, no. 9, pp. 5007–5013. <https://doi.org/10.1063/1.357212>
- Gregorčič P., Jezeršek M., Možina J. Optodynamic energy-conversion efficiency during an Er:YAG-laser-pulse delivery into a liquid through different fiber-tip geometries. *Journal of Biomedical Optics*, 2012, vol. 17, no. 7, pp. 0750061. <https://doi.org/10.1117/1.jbo.17.7.075006>
- Lippert B.M., Teymoortash A., Folz B.J., Werner J.A. Coagulation and temperature distribution in Nd: YAG interstitial laser thermotherapy: An in vitro animal study. *Lasers in Medical Science*,

8. Russo V., Righini G., Sottini S., Trigari S. Optical fibres for medical applications: output beam shaping // *Proceedings of SPIE*. 1985. V. 0522. P. 166–173. <https://doi.org/10.1117/12.946237>
9. Clarkin J.P., Timmerman R.J., Shannon J.H. Shaped fiber tips for medical and industrial applications // *Proceedings of SPIE*. 2004. V. 5317. P. 70. <https://doi.org/10.1117/12.540734>
10. Беликов А.В., Гагарский С.В., Сергеев А.Н., Смирнов С.Н. Исследование гидродинамических процессов в жидкости при воздействии мощных микросекундных импульсов Yb,Er:Glass-лазера // *Известия вузов. Приборостроение*. 2017. Т. 60. № 4. С. 367–374. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-4-367-374>
8. Russo V., Righini G., Sottini S., Trigari S. Optical fibres for medical applications: output beam shaping. *Proceedings of SPIE*, 1985, vol. 0522, pp. 166–173. <https://doi.org/10.1117/12.946237>
9. Clarkin J.P., Timmerman R.J., Shannon J.H. Shaped fiber tips for medical and industrial applications. *Proceedings of SPIE*, 2004, vol. 5317, pp. 70. <https://doi.org/10.1117/12.540734>
10. Belikov A.V., Gagarsky S.V., Sergeev A.N., Smirnov S.N. Study of hydrodynamic processes in liquids under the influence of powerful microsecond Yb,Er:glass laser pulses. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 4, pp. 367–374. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-4-367-374>

Авторы

Нассер Раед — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0005-7557-1777>, raedrr9898@gmail.com

Смирнов Сергей Николаевич — кандидат технических наук, ассистент, ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7202271405](https://orcid.org/0000-0003-1891-9122), <https://orcid.org/0000-0003-1891-9122>, sns@itmo.ru

Authors

Raed Nasser — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0005-7557-1777>, raedrr9898@gmail.com

Sergey N. Smirnov — PhD, Assistant, Leading Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7202271405](https://orcid.org/0000-0003-1891-9122), <https://orcid.org/0000-0003-1891-9122>, sns@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 30.10.2023
Одобрена после рецензирования 16.12.2023
Принята к печати 16.01.2024

Received 30.10.2023
Approved after reviewing 16.12.2023
Accepted 16.01.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»