

**Численное моделирование лазера на парах меди с индукционным разрядом и дополнительным подогревом***В. М. Батенин, Н. А. Лябин, М. М. Маликов*

*Представлены результаты численного моделирования параметров выходного излучения и эффективности лазера на парах меди, возбуждаемого импульсно-периодическим индукционным разрядом трансформаторного типа. Такой безэлектродный способ возбуждения является новым для лазера на парах меди и на практике пока не осуществлён. Выбраны параметры макета малого масштаба для проведения экспериментов по накачке индукционным разрядом рабочей среды такого лазера. Решена тепловая задача и определена дополнительная мощность, необходимая для нагрева разрядной трубки до требуемой температуры при пониженных мощностях разряда, возбуждающего лазерную среду.*

*Ключевые слова:* лазер на парах меди, индукционный разряд, численное моделирование, дополнительный подогрев, мощность излучения.

**Ссылка:** Батенин В. М., Лябин Н. А., Маликов М. М. // Прикладная физика. 2020. № 5. С. 97.

**Reference:** V. M. Batenin, N. A. Lyabin, and M. M. Malikov, Applied Physics, No. 5, 97 (2020).

**Введение**

Лазеры на парах металлов (ЛПМ) [1], возбуждаемые импульсно-периодическим электродным разрядом находят широкое применение в прецизионной микрообработке разнообразных материалов, в диагностике газовых потоков, науке, медицине и других областях [2–4]. Безэлектродная индукционная импульсно-периодическая накачка возможно позволит упростить конструкцию отпаянных лазерных элементов на парах металлов, снизить их стоимость и, по всей вероятности, ре-

шить задачу долговечности и надёжности лазеров этого класса.

Особенностью высокотемпературных индукционных лазеров на парах меди (ИЛПМ) является наличие толстой теплоизоляции между наружной стенкой и плазменным объёмом, что уменьшает коэффициент связи  $K_{св}$  в трансформаторной схеме возбуждения. Достаточно высокий коэффициент связи  $K_{св} \sim 0,4-0,6$ , как показано в наших численных работах [5, 6], можно получить с использованием особых кольцевых разрядных камер большого объёма ( $\sim 10^3$  см<sup>3</sup> и более). При этом реализуется саморазогревный режим работы ИЛПМ и высокая эффективность лазера. Создание ИЛПМ такого масштаба представляет сложную задачу. Необходима разработка генератора электрических импульсов накачки с высокой средней (по частоте следования) мощностью. На первом этапе проще использовать разрядные трубки с небольшим цилиндрическим рабочим объёмом ( $\sim 10^2$  см<sup>3</sup>), что снижает требование к источнику накачки, однако в этом случае величина  $K_{св}$  не превысит величины 0,1–0,2. Это обстоятельство затрудняет получение больших значений вихревого

**Батенин Вячеслав Михайлович**<sup>1</sup>, советник РАН, чл.-корр. РАН, д.т.н.

**Лябин Николай Александрович**<sup>2</sup>, нач. лаб., д.т.н.

**Маликов Михаил Максимович**<sup>1</sup>, в.н.с., д.ф.-м.н.

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН).

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

E-mail: mmalikov@oivtran.ru

<sup>2</sup> НПП «ИСТОК».

Россия, 141190, Московская обл., г. Фрязино,

ул. Вокзальная, 2а.

Статья поступила в редакцию 03 сентября 2020 г.

© Батенин В. М., Лябин Н. А., Маликов М. М., 2020

электрического поля, необходимого для возбуждения рабочей среды и для достижения саморазогревного режима работы таких разрядных трубок. В этом случае, как и в обычных электродных ЛПМ [3, 7, 8], предлагается осуществлять дополнительный подогрев трубки, чтобы обеспечить необходимую температуру стенки и концентрацию паров меди и получить генерацию излучения ИЛПМ. В предыдущей нашей работе [9] для подогрева рассматривалось использование вспомогательного электродного разряда с кратковременным его отключением (на 1–2 с) и включением на этот период времени индукционного разряда. В данной работе рассмотрен вариант подогрева стенок омическим нагревателем, работающим в постоянном режиме дополнительно к непрерывному импульсно-периодическому индукционному разряду. В расчётах определены доли мощности, необходимые на дополнительный подогрев при пониженных средних мощностях источника накачки лазера. Результаты данного численного моделирования будут полезны при создании макета ИЛПМ, который позволит провести экспериментальную проверку полученных расчетно-теоретических результатов и определить перспективу развития таких лазеров.

### Численное моделирование ИЛПМ малого масштаба

За основу конструкции ИЛПМ с разрядной камерой малого объема ( $\sim 100 \text{ см}^3$ ) можно взять активный элемент (АЭ) типа LT-6Cu [2]. При этом, мы будем ориентироваться и на материалы, из которых они изготавливаются. Проект конструкции экспериментального ИЛПМ с цилиндрической разрядной камерой представлен на рис. 1. Рабочий объем, образован трубкой с внутренним диаметром  $2r_1 = 20 \text{ мм}$

и с толщиной стенки 2–5 мм из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  99,6%. Толщина стенки кварцевого кожуха ( $r_4 - r_3$ ) = 3 мм. Длина горячей зоны камеры и индуктора  $\sim 400 \text{ мм}$ . Эти геометрические размеры соответствуют, аналогичным размерам в АЭ LT-6Cu. По сравнению с этим АЭ, уменьшен наружный диаметр кварцевого кожуха  $2r_4$  до 71 мм и толщина теплоизоляции ( $r_3 - r_2$ ) до 20 мм с тем, чтобы увеличить коэффициент связи индуктора  $K_{\text{св}}$ . В этом случае, при внутреннем диаметре индуктора  $2r_5 = 77 \text{ мм}$  и толщине воздушного зазора ( $r_5 - r_4$ ) = 3 мм коэффициент  $K_{\text{св}} \approx 0,23$ . Теплоизоляция представляет собой засыпку микросферами из окиси алюминия с эффективной теплопроводностью  $\sim 0,3 \text{ Вт/м К}$  [2]. Рабочее тело – смесь паров меди и инертного газа неона. В данной работе мы не будем рассматривать конкретную конструкцию омического нагревателя. Очевидно, что его конструкция должна быть совместима с особенностями индукционной накачки лазера.

На первом этапе конструирования проводился тепловой расчет нагрева всех стенок разрядной камеры. При охлаждении индуктора водой, его температура задавалась  $T_5 = 323 \text{ К}$ , при воздушном охлаждении она вычислялась при заданной температуре окружающего воздуха в  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . В расчётах рассматривался одновитковый (сплошной) индуктор из меди. Отметим, что при выбранной толщине воздушного зазора теплопередача в нём определяется, в основном, молекулярной теплопроводностью воздуха, в отличие от обычного электродного ЛПМ, где передача тепла к кожуху (охлаждаемому водой) осуществляется за счёт тепловой конвекции. При решении тепловой задачи в воздушном зазоре учитывалась зависимость теплопроводности воздуха от температуры, а также радиационный теплообмен между поверхностями.

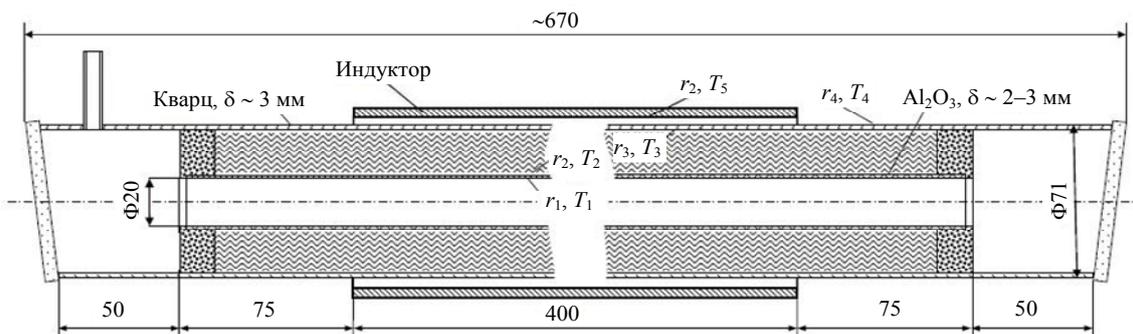


Рис. 1. Схема экспериментального ИЛПМ с цилиндрической разрядной камерой ( $V \sim 100 \text{ см}^3$ ).

Также делалась поправка на вынос энергии тепловым излучением керамической трубки через оба торца камеры.

На рис. 2. представлены температуры основных стенок разрядной камеры в зависимости от вкладываемой в рабочий объём средней мощности тепловыделения  $W_j$ .

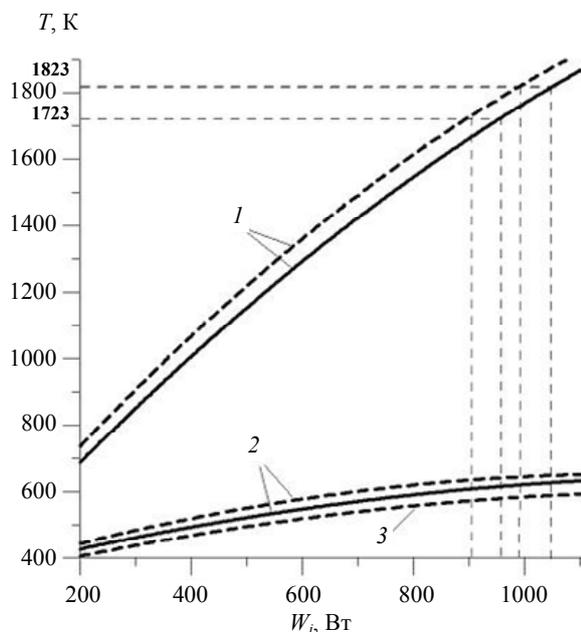


Рис. 2. Зависимость температур стенок разрядной камеры  $T_1 - 1$ ,  $T_4 - 2$  и температур индуктора  $T_5 - 3$  от вкладываемой мощности  $W_j$ . Сплошные кривые – при охлаждении индуктора водой, пунктир – при воздушном конвективном охлаждении индуктора.

Как видно из рис. 2 для нагрева стенки до температур  $T_1 = 1750-1850$  К, необходима мощность  $W_j \approx 900-1100$  Вт (при обоих способах охлаждения). Температура наружной стенки получается не высокой  $T_4 \approx 620-650$  К, допустимой для кварца. При воздушном охлаждении индуктора его температура не превысит  $T_5 \approx 590$  К.

Для численного моделирования параметров плазмы и излучения ИЛПМ малого масштаба использовались разработанная нами физическая модель и комплекс вычислительных программ [5, 6, 10–12]. Рассматривалась электрическая схема с прямым разрядом накопительной емкости  $C = 0,25$  нФ, на одновитковый индуктор диаметром 77 мм и  $K_{св} \approx 0,23$ . Импульсы накачки представляли собой цуги затухающих ВЧ (~65 МГц) колебаний тока, следующих друг за другом с задаваемой частотой  $f = 5-10$  кГц. Длительность цугов тока находилась в пределах от 300 нс до 700 нс и зависела как от запасённой энергии в накопительной ёмкости, так и от давления неона  $P_{Ne}$ , частоты  $f$  и температуры  $T_1$ , которые влияют на величину и динамику изменения электрического сопротивления плазмы в течение импульса накачки [5, 10, 11]. Отметим, что характерная длительность цугов мгновенной электрической мощности вводимой в плазму в полтора–два раза меньше длительности цугов тока.

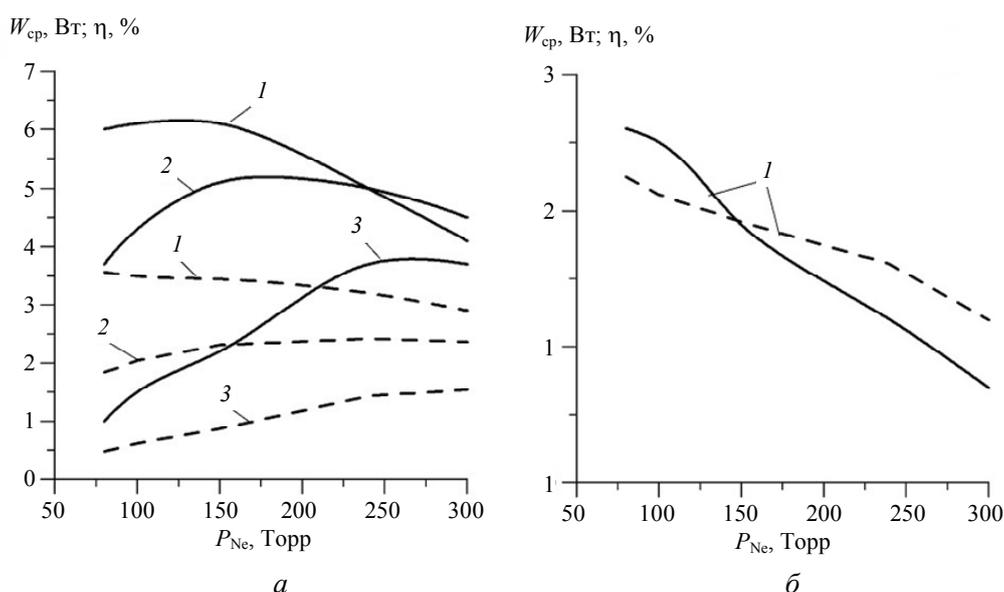


Рис. 3. Зависимость мощности излучения  $W_{cp}$  (сплошные линии) и КПД  $\eta$  (пунктир) от давления неона: 1 –  $f = 6$  кГц; 2 –  $f = 8$  кГц; 3 –  $f = 10$  кГц. (а) –  $T_1 = 1823$  К и  $U_c(0) = 32$  кВ, (б) –  $T_1 = 1723$  К и  $U_c(0) = 22$  кВ.

На рис. 3 представлена зависимость средней (по частоте следования  $f$ ) мощности излучения  $W_{\text{ср}}$  лазера и физического КПД  $\eta$  от  $P_{\text{Ne}}$  при заданных значениях  $f$ ,  $T_1$  и начального напряжения  $U_c(0)$  на накопительной ёмкости. Величина  $\eta$  определяется как отношение энергии импульса излучения к электрической энергии, вложенной в плазму на момент окончания лазерной генерации в импульсе накачки [1].

Как видно из рис. 3 (слева) максимальная мощность лазера  $W_{\text{ср}} \approx 6$  Вт достигается при давлении неона  $P_{\text{Ne}} \approx 150$  Торр, частоте следования  $f \approx 6$  кГц. Значения этих параметров примерно в два раза ниже, оптимальных значений в АЭ ЛТ-6Cu. Это связано с тем, что величина вихревого электрического поля, из-

за малого значения  $K_{\text{св}}$ , меньше величины электрического поля в электродном разряде даже при максимальном напряжении на индукторе  $U_c(0) = 32$  кВ.

Расчёт показывает, что достаточно высокие значения  $W_{\text{ср}}$ ,  $\eta$  можно получить и при сниженных значениях  $U_c(0)$ ,  $P_{\text{Ne}}$ ,  $T_1$  и  $f$  (рис. 3 (справа)). Так при  $P_{\text{Ne}} = 80$  Торр,  $f = 6$  кГц и  $U_c(0) = 22$  кВ средняя выходная мощность излучения составила  $W_{\text{ср}} \approx 2,6$  Вт, мощность источника накачки ИЛПМ от выпрямителя 360 Вт, а средняя мощность  $W_j$  вкладываемая индукционным разрядом в плазму 210 Вт. При таком значении  $W_j$ , решение тепловой задачи даёт температуру внутренней стенки разрядной камеры равной  $\sim 700$  К (см. рис. 2).

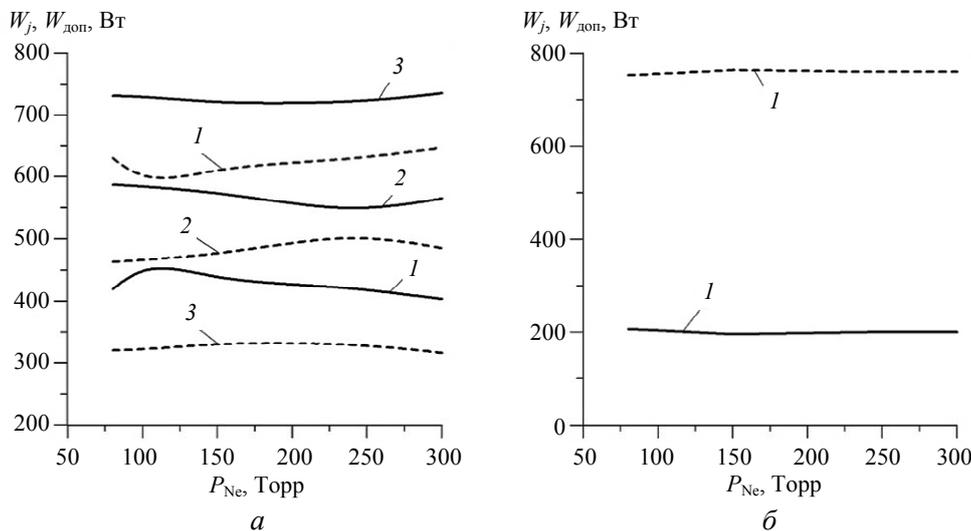


Рис. 4. Зависимость вкладываемой мощности  $W_j$  (сплошные линии) и дополнительной мощности  $W_{\text{доп}}$  (пунктир) от давления неона: 1 –  $f = 6$  кГц; 2 –  $f = 8$  кГц; 3 –  $f = 10$  кГц. (а) –  $T_1 = 1823$  К и  $U_c(0) = 32$  кВ, (б) –  $T_1 = 1723$  К и  $U_c(0) = 22$  кВ.

Таким образом, этой мощности не достаточно для разогрева стенки до заданной температуры  $T_1 = 1723$  К. Согласно кривым на рис. 2 дополнительная мощность на подогрев стенок камеры должна составить  $W_{\text{доп}} \approx 690$ – $750$  Вт.

На рис. 4 представлены зависимости  $W_j$  и  $W_{\text{доп}}$  от основных задаваемых параметров для всех вариантов расчёта (при охлаждении индуктора водой). Видно, что эти мощности слабо изменяются от давления неона и существенно зависят от задаваемых значений частоты  $f$  и температуры  $T_1$ .

При  $f > 8$  кГц и  $T_1 > 1800$  К значения  $W_j$  превышают 700 Вт, а средняя мощность по-

требляемая источником импульсов накачки от сети может превысить заданный уровень в один киловатт. Поэтому для реализации экспериментального макета ИЛПМ лучше выбрать область пониженных значений задаваемых параметров. Для примера, на рис. 5 показаны импульсы излучения  $W_{\text{las}}(t)$  и активного напряжения  $U_{\text{ак}}(t)$  на сопротивлении плазменного витка при  $U_c(0) = 27$  кВ,  $P_{\text{Ne}} = 100$  Торр,  $T_1 = 1723$  К и  $f = 6$  кГц.

Для этого варианта пиковая мощность излучения ИЛПМ составила  $W_{\text{las}} \approx 27$  кВт,  $W_{\text{ср}} \approx 3$  Вт,  $\eta \approx 1,7$  %, при приемлемых значениях  $W_j \approx 300$  Вт и  $W_{\text{доп}} \approx 650$  Вт.

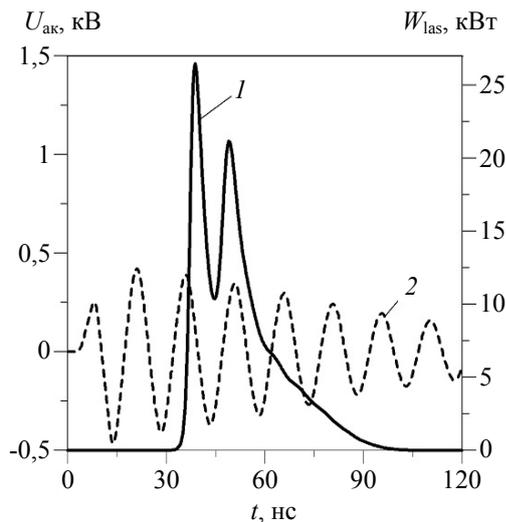


Рис. 5. Импульс излучения ИЛПМ  $W_{las}(t)$  – 1 и  $U_{ak}(t)$  – 2.

### Заключение

Численным методом показано, что в ИЛПМ с небольшим рабочим объемом ( $\sim 10^2 \text{ см}^3$ ), используя дополнительный подогрев трубки, можно получить устойчивую и эффективную генерацию излучения ИЛПМ на уровне нескольких ватт с физическим КПД  $\sim (1,5-3) \%$ . Определены основные электрические, технические и тепловые параметры экспериментального макета. Реализация такого устройства позволит провести экспериментальную проверку полученных расчетно-теоретических результатов и оценить возможность использования индукционного разряда для накачки лазеров на парах металлов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Батенин В. М., Бойченко А. М., Бучанов В. В., Казарян М. А., Климовский И. И., Молодых Э. И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2. Т. 1 / Под ред. Батенина В. М. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. ISBN 978-5-9221=1085-3
2. Григорьянц А. Г., Казарян М. А., Лябин Н. А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. – М.: Физматлит, 2005.
3. Григорьянц А. Г., Казарян М. А., Лябин В. Н. Лазерная прецизионная микрообработка материалов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. ISBN 978-5-9221-1699-2.
4. Вараксин А.Ю. // ТВТ. 2003. Т. 41. № 5. С. 746.
5. Batenin V. M., Kazaryan M. A., Karpukhin V. T., Lyabin N. A. and Malikov M. M. // Plasma Physics Reports. 2016. Vol. 42. № 11. P. 1057. ISSN 1063-780X.
6. Batenin V. M., Kazaryan M. A., Karpukhin V. T., Malikov M. M. // High Temperature. 2017. Vol. 55. № 5. P. 678. doi.org/10.1134/S0018151X17050030.
7. Walter W. T., Solimene N., Piltch M., Gould G. // IEE J. Quantum Electronics. 1966. Vol. Q-2. № 9. P. 474.
8. Тригуб М.В., Федоров В.Ф., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 3. С. 203. DOI: 10.15372/AOO20180308.
9. Batenin V. M., Dyachkovski D. A., Kazaryan M. A., Karpukhin V. T., Lyabin N. A., Malikov M. M. // Proc. SPIE. 2019. V. 11322. P.113220G. DOI: 10.1117/12.2550637. ISSN 0277-786X.
10. Malikov M. M., Kazaryan M. A., Karpukhin V. T. // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2015. Vol. 42. № 5. P. 138. ISSN 1068-3356.
11. Batenin V. M., Kazaryan M. A., Karpukhin V. T., Lyabin N. A., Malikov M. M., Sachkov V. I., Feofanov I. N. “Characteristics of inductive coaxial copper vapour lasers,” Proc. SPIE 10614, International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers XIII, 1061405 (16 April 2018); DOI: 10.1117/12.2303584.
12. Батенин В. М., Бохан П. А., Бучанов В. В., Евтушенко Г. С., Казарян М. А., Карпукхин В. Т., Климовский И. И., Маликов М. М. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2. Т. 2 / Под ред. Батенина В. М. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011.

PACS: 07.50.-e

## Numerical simulation of a copper vapor laser with induction discharge and additional heating

V. M. Batenin<sup>1</sup>, N. A. Lyabin<sup>2</sup>, and M. M. Malikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences  
Bd. 2 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

<sup>2</sup> A. I. Shokin ISTOK Research and Production Enterprise  
2a Vokzalnaya st., Moscow Region, Fryazino, 141190, Russia

Received September 03, 2020

***The results of numerical simulation of the output radiation parameters and the efficiency of copper vapor laser excited by a pulse-periodic induction discharge of transformer type are presented. This electrodeless excitation method is new for a copper vapor laser and has not yet been implemented in practice. The parameters of a small-scale layout for conducting experiments on pumping the working medium of such a laser with an induction discharge are selected. The thermal problem is solved and the additional power required to heat the discharge tube to the required temperature at reduced discharge powers that excite the laser medium is determined.***

**Keywords:** copper vapor laser, induction discharge, numerical simulation, additional heating, radiation power.

## REFERENCES

1. V. M. Batenin, A. M. Boichenko, V. V. Buchanov, M. A. Kazaryan, I. I. Klimovskii, and E. I. Molodykh, *Lazery na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov (Lasers on Self-Terminating Transitions of Metal Atoms)*. (Fizmatlit, Moscow, 2011), vol. 1. ISBN 978-5-9221-1085-3
2. A. G. Grigor'yants, M. A. Kazaryan, and N. A. Lyabin, *Lazery na parakh medi: konstruktsiya, kharakteristiki i primeneniya (Copper Vapor Lasers: Design, Parameters, and Application)*. (Fizmatlit, Moscow, 2005).
3. A. G. Grigor'yants, M. A. Kazaryan, and N. A. Lyabin, *Lazernaya precizionnaya mikroobrabotka materialov (Laser precision micromachining of materials)*. (Fizmatlit, Moscow, 2017). ISBN 978-5-9221-1699-2
4. A. Yu. Varaksin, *High Temperature* **41** (5), 657 (2003). DOI 10.1023/A:1026148829199
5. V. M. Batenin, M. A. Kazaryan, V. T. Karpukhin, N. A. Lyabin, and M. M. Malikov, *Plasma Physics Reports* **42** (11), 1057 (2016). ISSN 1063-780X.
6. B. M. Batenin, M. A. Kazaryan, V. T. Karpukhin, and M. M. Malikov, *High Temperature* **55** (5), 678 (2017). doi.org/10.1134/S0018151X17050030.
7. W. T. Walter, N. Solimene, M. Piltch, and G. Gould, *IEEE J. Quantum Electronics* **Q-2** (9), 474 (1966).
8. M. V. Trigub, V. F. Fedorov, D. V. Shieanov, and G. S. Evtushenko, *Optika atmosfery i oktana (Atmospheric and Oceanic Optics)* **31** (3), 203 (2018). DOI: 10.15372/AOO20180308.
9. V. M. Batenin, D. A. Dyachkovski, M. A. Kazaryan, V. T. Karpukhin, N. A. Lyabin, and M. M. Malikov, *Proc. SPIE* **11322**, 113220G (2019). DOI: 10.1117/12.2550637. ISSN 0277-786X.
10. M. M. Malikov, M. A. Kazaryan, and V. T. Karpukhin, *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **42** (5), 138 (2015). ISSN 1068-3356.
11. V. M. Batenin, M. A. Kazaryan, V. T. Karpukhin, N. A. Lyabin, M. M. Malikov, V. I. Sachkov, and I. N. Feofanov, "Characteristics of inductive coaxial copper vapour lasers," *Proc. SPIE* 10614, International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers XIII, 1061405 (16 April 2018); DOI: 10.1117/12.2303584.
12. V. M. Batenin, P. A. Bokhan, V. V. Buchanov, G. S. Evtushenko, M. A. Kazaryan, V. T. Karpukhin, I. I. Klimovskii, and M. M. Malikov, *Lazery na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov (Lasers on Self-Terminating Transitions of Metal Atoms)*, (Moscow, Fizmatlit, 2011), vol. 2.