

## Ультрафиолетовое излучение импульсно-периодических разрядов в инертных газах

В. М. Градов, С. В. Гавриш, С. С. Коробков, Д. Ю. Пугачев

*Проведены численные эксперименты для исследования влияния геометрических (диаметр разрядного канала, межэлектродное расстояние), электрических (удельная электрическая мощность, средняя мощность периодически следующих импульсов) и физических параметров (давление наполнения, состав плазмообразующих сред) разрядов в ксеноне и криптоне на спектрально-энергетические характеристики импульсных источников излучения. Получен широкий набор данных по параметрам разрядов, включая температурные поля в разряде и спектральные распределения излучения. Определены условия, при которых может быть обеспечен заданный уровень пиковой силы излучения в УФ-области спектра. Указаны диапазоны частот следования импульсов и средних электрических мощностей, обеспечивающих выполнение поставленных требований по выходу УФ-излучения. Дана оценка влияния эффекта обратной непрозрачности кварца на мощность коротковолнового излучения. Результаты расчетов подтверждены в ходе экспериментальных работ.*

*Ключевые слова:* ультрафиолетовое излучение, импульсный разряд, плазма, ксенон, криптон, вычислительный эксперимент, пиковая сила излучения, электрическая мощность.

**Ссылка:** Градов В. М., Гавриш С. В., Коробков С. С., Пугачев Д. Ю. // Прикладная физика. 2019. № 6. С. 18.

**Reference:** V. M. Gradov, S. V. Gavrish, S. S. Korobkov, and D. Yu. Pugachev, Prikl. Fiz., No. 6, 18 (2019).

### Введение

Импульсные разрядные источники излучения с инертным наполнением широко применяются в современных оптических технологиях, квантовой электронике, специальном оборудовании для военных целей, светотех-

нике и многих других отраслях науки, производства и техники. Важнейшими преимуществами данных источников излучения являются высокий КПД преобразования электрической энергии в лучистую, достигающий в ряде случаев 70–80 и даже 90 %, обширный диапазон изменения спектральных распределений в зависимости от удельной электрической мощности (от ярко выраженного линейчатого спектра при низких мощностях до сплошного при высоких), подтвержденная годами эксплуатации надежность конструкции с кварцевой оболочкой и отработанной схемой ввода электродов и многое другое.

Среди относительно новых направлений применения ламп с инертно-газовым наполнением [1–5], а также ультрафиолетовых источников иных типов [6–8] следует отметить использование бактерицидного действия УФ-излучения в быту и на производстве для обез-

---

Градов Владимир Михайлович<sup>1</sup>, д.т.н., профессор.

Гавриш Сергей Викторович<sup>2</sup>, нач. отдела, д.т.н.

Коробков Сергей Сергеевич<sup>1</sup>, аспирант.

Пугачев Дмитрий Юрьевич<sup>2</sup>, зам. нач. лаб.

<sup>1</sup> МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

E-mail: gradov@bmstu.ru, sergs933@gmail.com

<sup>2</sup> ООО «НПП «Мелитта».

Россия, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 16/10.

E-mail: svgavr@list.ru, d.u.pugachev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15 октября 2019 г.

---

© Градов В. М., Гавриш С. В., Коробков С. С., Пугачев Д. Ю., 2019

зараживания жидкостей, продуктов питания, воздуха в помещениях, радиоактивных отходов и др.

Важным приложением для источников излучения рассматриваемого типа следует считать системы комплексной оптоэлектронной защиты летательных аппаратов от переносных наземных средств поражения. В этих системах источники излучения должны в числе прочих характеристик обеспечивать заданные значения пиковой силы излучения в определенных фиксированных областях спектра при ограничениях на среднюю электрическую мощность в частотных режимах работы.

В настоящей работе на основе математической модели, реализованной в соответствующем программно-алгоритмическом обеспечении [9–12], выполнено исследование влияния различных факторов на пиковую силу УФ-излучения в диапазоне 250–450 нм в случае Хе и 270–450 нм в случае Кг с целью оценить условия реализации предельных уровней коротковолновых излучательных характеристик разрядов в ксеноне и криптоне при их использовании в указанных системах.

Далее мы будем оперировать радиационными потоками на внутренней поверхности, стабилизирующей разряд трубки, измерить которые, понятно, затруднительно. В итоге удастся изучить в чистом виде влияние определяющих факторов на излучательную способность разряда без искажения результатов эффектами поглощения излучения кварцевым стеклом.

### **Компьютерная модель разряда и информационное оснащение вычислительных экспериментов**

Исследование процессов в разрядах осуществлялось на базе математических моделей и методов их реализации, детально описанных в [9–11]. На основе этих моделей могут быть исследованы лампы постоянного и переменного тока, импульсного и импульсно-периодического действия с широкой номенклатурой плазмообразующих сред (Хе, Кг, Нг, Cs, Na, К, Rb). Модели построены с учетом следующей физической картины процессов, протекающих в разрядной плазме.

Излучение разрядов распределено в широком спектральном диапазоне от ультрафио-

летовой до далекой инфракрасной области, имеет сложный спектральный состав, включая непрерывную и дискретную компоненты, и определяется большим количеством разнообразных элементарных радиационных процессов, причем при изменении режимов работы излучателя, геометрии системы, давления наполнения, состава плазмообразующей среды и т. д. в роли доминирующих выступают различные процессы и механизмы воздействия на излучающие центры.

Линии в плазме уширены разными механизмами, значимость каждого из которых зависит от параметров плазмы и неодинакова для линий разных серий. При высоких концентрациях электронов определяющая роль принадлежит штарковскому ударному уширению электронами.

Подавляющее большинство приемников излучения реагирует на излучение в сравнительно узких спектральных интервалах, поэтому при описании спектров источников излучения нужна тщательная проработка отдельных спектральных компонент вплоть до учета «тонких» деталей поведения оптических свойств, например, в крыльях линий и рассмотрения сдвигов центров линий и асимметрии их контуров.

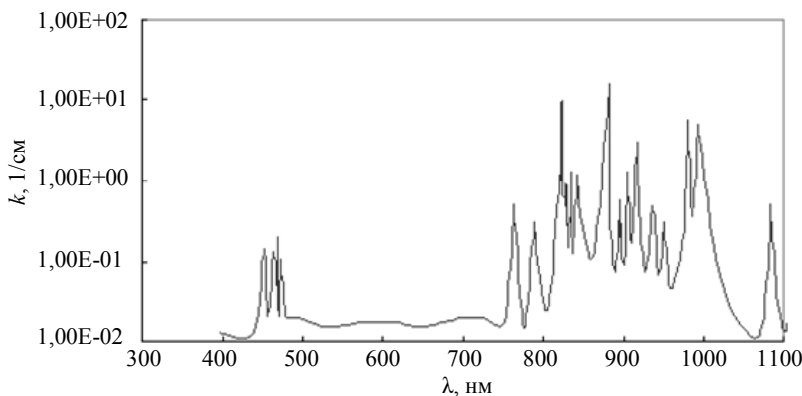
Процессы в импульсных разрядах являются нестационарными, плазма неоднородна по объему, и в ней возможно проявление эффектов неравновесности и неидеальности. Состояние плазмы зависит от давления, состава плазмообразующей среды и режима работы. Плазма высокого давления, которая рассматривается в данной работе, характеризуется давлениями 0,5–4,0 МПа и температурами на оси разряда  $(7–12) \times 10^3$  К. Для плазмы низкого давления характерны значения давления от нескольких десятых до сотен единиц Па. Времена прохождения тока в импульсных режимах имеют порядок сотни микросекунд.

Физические процессы в исследуемых разрядах протекают в условиях, близких к локальному термодинамическому равновесию (ЛТР). Для разрядов низкого давления характерна сильная неравновесность [12].

Реальный вычислительный эксперимент требует весьма полной и надежной базы данных по широкому кругу характеристик элементов систем и используемых материалов. База данных, использованная в настоящей ра-

боте, состоит из множества подсистем, среди которых центральное место занимает подсистема, связанная с информационным обеспечением моделирования процессов в плазме.

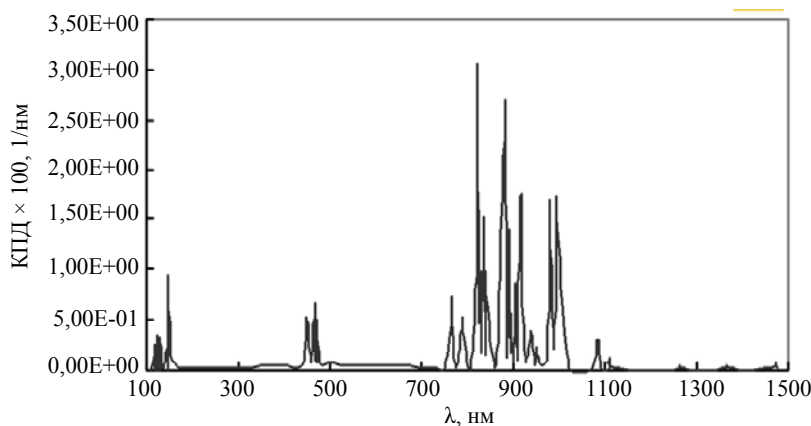
При построении данной подсистемы последовательно проводится принцип, согласно которому ее пополнение может производиться путем отбора данных из любых источников, но все основные характеристики плазмы должны быть обеспечены хорошо апробированными методами и средствами моделирования. На рис. 1 представлены данные по рассчитанному коэффициенту поглощения плазмы ксенона с той степенью детализации, с которой они хранятся в базе данных и используются при моделировании процессов в разрядах.



*Рис. 1. Коэффициент поглощения  $k$  плазмы Xe в широком диапазоне спектра. Рабочее давление = 1,5 МПа, температура плазмы  $T = 8000$  К.*

### Результаты исследования

При проведении вычислительных экспериментов рассчитывались температурные поля в плазме, поля концентраций электронов, атомов и ионов, спектры излучения с детальной проработкой линейчатой и непрерывной составляющих. Пример спектрального распределения КПД излучения в ксеноновой плазме представлен на рис. 2.



*Рис. 2. Спектральное распределение КПД излучения в разряде в максимуме тока: Xe, радиус канала  $R = 0,25$  см, давление наполнения  $P_0 = 160$  мм рт. ст., ток  $I = 40$  А, напряженность  $E = 14$  В/см,  $\langle w \rangle = 0,29 \times 10^4$  Вт/см<sup>3</sup>, пиковая сила излучения  $I = 31$  Вт/стер.*

В литературе известно немного публикаций подробных таблиц данного коэффициента (см. библиографию в [12]).

Отметим что параметры элементарных процессов и квантовые характеристики частиц [13] являются той исходной информацией, которая используется в моделях ЛТР-плазмы через термодинамические, теплофизические и оптические характеристики плазмы, а в моделях неравновесной плазмы – непосредственно.

Помимо подсистемы, обслуживающей моделирование разрядов, необходимы также другие подсистемы, поставляющие информацию по радиационным и теплофизическим свойствам материалов и поверхностей элементов осветительных устройств.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости пиковой силы ультрафиолетового излучения разрядов от удельной электрической мощности  $\langle w \rangle$ , вводимой в разряд, радиуса разрядного канала  $R$ , начального давления наполнения  $p_0$  (для ксеноновых разрядов) и рабочего давления в разряде (для криптоновых разрядов). При этом поглощение излучения в кварцевых оболочках ламп не учитывается. Этот вопрос будет рассмотрен ниже.

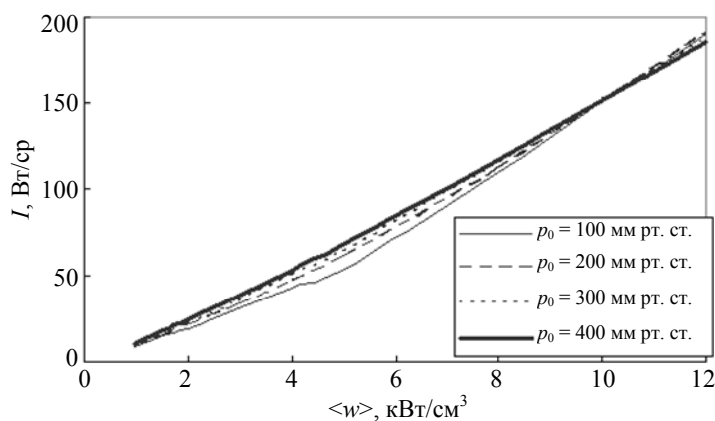


Рис. 3. Зависимость пиковой силы излучения разряда  $I$  в области спектра 250–450 нм от удельной электрической мощности  $\langle w \rangle$  и начального давления  $p$  наполнения. Плазмообразующая среда – Xe.  $R = 0,25$  см.

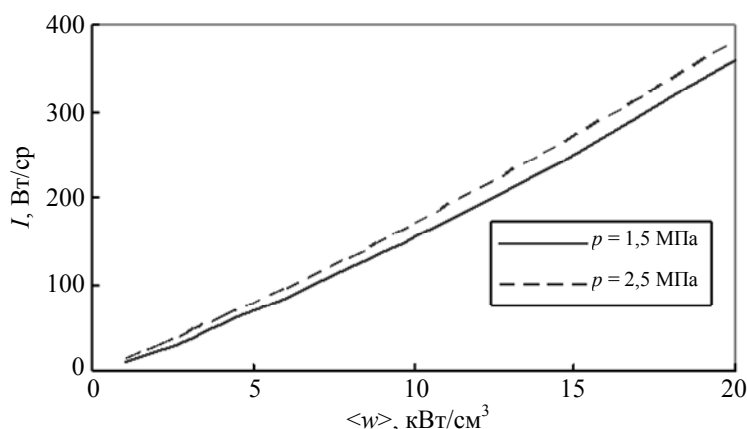


Рис. 4. Зависимость пиковой силы излучения разряда  $I$  в области спектра 270–450 нм от удельной электрической мощности  $\langle w \rangle$  и рабочего давления  $p$  в разряде. Плазмообразующая среда – Kr,  $R = 0,25$  см.

Из рисунков следует, что пиковая сила излучения  $I$  в УФ-области сильно зависит от  $\langle w \rangle$  и относительно слабо – от  $p_0$ , причем по мере роста удельной электрической мощности зависимость от  $p_0$  становится все более слабой. В случае Xe, при  $\langle w \rangle$  больше, чем 10 кВт/см<sup>3</sup> для  $R = 0,25$  см кривые для начальных давлений  $p_0 = 100$ –400 мм рт. ст. практически сливаются. Например, для Xe при радиусе разрядного промежутка  $R = 0,25$  см при  $\langle w \rangle = 5$ –6 кВт/см<sup>3</sup> изменение  $p_0$  от 100 до 400 мм рт. ст. приводит к росту пиковой силы излучения  $I$  на 25 %, в то же время при  $\langle w \rangle = 12$  кВт/см<sup>3</sup> изменение  $p_0$  в том же диапазоне приводит к снижению  $I$  всего примерно на 2,5 %.

В области относительно малых удельных электрических мощностей пиковая сила ультрафиолетового излучения растет с ростом давления, а при больших  $\langle w \rangle$  эта зависимость сменяется на обратную. Данное обстоятельство связано с совместным влиянием двух факторов: с ростом давления, с одной стороны, растет коэффициент поглощения в УФ-диапазоне, с другой стороны, уменьшается уровень температур в разряде.

В случае криптонового разряда (см. рис. 4) отмеченный характер зависимостей сохраняется.

Рассмотрим вопрос выбора средней электрической мощности  $P_s$ , обеспечивающей заданный уровень излучения в УФ-части спектра. Средняя электрическая мощность, вводимая в разряд, определяется по формуле

$$P_s = \langle w \rangle \tau V f,$$

где  $\tau$  – длительность импульса;  $f$  – частота следования импульсов;  $V$  – объем разрядного промежутка.

Определим минимальное значение средней электрической мощности  $P_{s \min}$ , обеспечивающую заданное значение пиковой силы излучения в ультрафиолетовой области при различных частотах следования импульсов. При  $P_s > P_{s \min}$  требования к пиковой силе излучения будут заведомо выполнены. По условиям работы источника излучения должна быть обеспечена величина силы излучения  $I = 25$  Вт/см<sup>2</sup>. Принимая  $\tau = 100$  мкс, получим следующую таблицу минимальных значений

средней электрической мощности, обеспечивающую заданную силу излучения 25 Вт/см.

Таблица

Минимальные значения средней электрической мощности  $P_{s \min}$ , обеспечивающую заданную силу излучения 25 Вт/см

Наполнение	R, см	f, Гц				
		10	30	50	500	1000
		$P_{s \min}$ , Вт				
Xe	0,25	3,2	9,6	16	160	320
	0,35	3,5	10,5	17,5	175	350
Kr	0,25	2,9	8,7	14,5	145	290

Видно, что требования к практически интересному диапазону средних электрических мощностей 100–300 Вт, в котором должна быть реализована заданная пиковая сила излучения, выполняется с большим запасом для интервала частот импульсов  $f = 10\text{--}50$  Гц. Поставленным условиям по средней мощности и пиковой силе излучения можно удовлетворить одновременно при частотах до 1 кГц.

Рассмотрим, как будет меняться мощность выходящего излучения в УФ-области спектра при сдвиге границы пропускания за счет динамического окрашивания. Для ксеноновых ламп с  $R = 0,25$  см при смещении границы пропускания до 360 нм и  $\langle w \rangle = 30$  кВт/см<sup>3</sup> пиковая сила излучения уменьшается почти на 40 %, а при  $\langle w \rangle = 100$  кВт/см<sup>3</sup> – на 45 %. Вообще говоря, например, при  $\langle w \rangle = 30$  кВт/см<sup>3</sup> распределение доли излучения в УФ-области имеет следующий характер: в диапазоне  $\Delta\lambda = 430\text{--}450$  нм излучается до 1 % от вкладываемой в разряд от электрической мощности, в диапазоне 360–430 нм – 3,7 %, в диапазоне 250–360 нм – 3,4 % (всего в диапазоне 250–450 нм, таким образом, имеем 8,1 %). При  $\langle w \rangle = 100$  кВт/см<sup>3</sup> значения доли излучения в указанных областях спектра оказываются следующими – 1,4, 5,3, 5,4% (всего 12,1 %).

### Заключение

В численных экспериментах по исследованию предельных возможностей разрядов в инертных газах (Xe, Kr) по обеспечению заданных уровней пиковой силы УФ-излучения варьировались давление в разряде, диаметр разрядного канала, удельная электрическая мощность и средняя электрическая мощность,

вводимая в разряд, а также частота следования импульсов. Показано, что разряды в ксеноне и криптоне с диаметрами канала 5 и 7 мм и давлениями наполнения 100–400 мм рт. ст. в диапазоне средних электрических мощностей 100–300 Вт обеспечивают заданную пиковую силу излучения (25 Вт/см) в УФ-области при частотах 10–50 Гц с большим запасом, а при частоте 1кГц – только при средней мощности около 290–300 Вт и выше. Установлено, что пиковая сила излучения в УФ-области с ростом удельной электрической мощности  $\langle w \rangle$  все меньше зависит от давления наполнения, и, если при малых  $\langle w \rangle$  пиковая сила излучения растет с ростом давления, то при больших  $\langle w \rangle$  у ксенона данная зависимость даже сменяется на обратную. Максимально наблюдаемое смещение границы пропускания кварца в красную сторону может существенно (до 40 %) снизить прогнозируемые значения пиковой силы излучения.

### ЛИТЕРАТУРА

- Hancock P., Curry R. D., McDonald K. F., Altgilbers L. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2004. Vol. 32. No. 5. P. 2026.
- Moreau M., Lescure G., Agoulon A., Svinareff P., Orangea N., Feuilloley M. // J. Appl. Toxicol. 2011. P. 1749. DOI: 10.1002/at.
- Abida J., Rayees B., Masoodi F. A. // Int. Food Res. J. 2014. Vol. 21. No. 3. P. 839.
- Мишаков М. А., Камруков А. С. // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. № 6. С. 29. DOI: 10.7463.0617.0001220.
- Архипов В. П., Камруков А. С., Козлов Н. П., Макачук А. А. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 102.
- Шуаибов А. К., Миня А. И., Гомоки З. Т., Грицак Р. В. // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114. № 2. С. 212.
- Шуаибов А. К., Гомоки З. Т., Калюжная А. Г., Щедрин А. И. // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 109. № 5. С. 728.
- Генерал А. А., Кельман В. А., Жменяк Ю. В., Шпеник Ю. О., Кленовский М. С. // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114. № 1. С. 28.
- Градов В. М., Гавриш С. В., Рудаков И. В. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 6. С. 130. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-130-145.
- Градов В. М., Щербаков А. А. // Оптика и спектроскопия. 1979. Т. 47. № 4. С. 635.
- Градов В. М., Иванов В. В., Терентьев Ю. И., Щербаков А. А. // ТВТ. 1981. Т. 19. № 1. С. 28.
- Градов В. М. // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 1 (1). С. 110. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-1-21.
- Saloman E. B. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2007. Vol. 33. № 3. P. 765.

## Ultraviolet radiation of pulsed periodic discharges in inert gases

V. M. Gradov<sup>1</sup>, S. V. Gavrish<sup>2</sup>, S. S. Korobkov<sup>1</sup>, and D. Yu. Pugachev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University  
5 2-ya Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia  
E-mail: gradov@bmstu.ru, sergs933@gmail.com

<sup>2</sup> Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd  
16/10 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russia  
E-mail: svgavr@list.ru, d.u.pugachev@gmail.com

Received October 15, 2019

*Numerical experiments were carried out to study the influence of geometric, electric and physical parameters discharges in xenon and in krypton into spectral and energy characteristics of pulsed radiation sources. A wide range of data of the parameters of the discharges, including the temperature fields in the discharge and the spectral distribution of radiation, have been obtained. The conditions under which a given level of peak radiation strength in the UV region of the spectrum can be ensured are determined. The frequency ranges of the pulses and the average electrical powers that ensure compliance with the requirements for the output of UV radiation are indicated. An assessment of the effect of reversible quartz opacity on the short-wavelength radiation power is given. The calculation results are confirmed in the course of experimental works.*

*Keywords:* ultraviolet radiation, pulsed discharge, plasma, xenon, krypton, computational experiment, peak radiation power, electric power.

### REFERENCES

1. P. Hancock, R. D. Curry, K. F. McDonald, and L. Altgilbers, IEEE Transactions on Plasma Science **32** (5), 2026 (2004).
2. M. Moreau, G. Lescure, A. Agoulon, P. Svinareff, N. Orangea, and M. Feuilloleya, J. Appl. Toxicol. 2011. P. 1749. DOI: 10.1002/at.
3. J. Abida, B. Rayees, and F. A. Masoodi, Int. Food Res. J. **21** (3), 839 (2014).
4. M. A. Mishakov and A. S. Kamrukov, Nauka i obrazovaniye. MGTU im. N. E. Baumana. Elektron. zhurn., No. 6, 29 (2017). DOI: 10.7463.0617.0001220
5. V. P. Arkhipov, A. S. Kamrukov, N. P. Kozlov, and A. A. Makarchuk, Prikl. Fiz., No. 6, 102 (2016).
6. A. K. Shuaibov, A. I. Minya, Z. T. Gomoki, and R. V. Gritsak, Opt. Spektrosc. **114** (2), 212 (2013).
7. A. K. Shuaibov, Z. T. Gomoki, A. G. Kalyuzhnaya, and A. I. Shchedrin, Opt. Spektrosc. **109** (5), 728 (2010).
8. A. A. General, V. A. Kelman, Yu. V. Zhmenyak, Yu. O. Shpenik, and M. S. Klenovskiy, Opt. Spektrosc. **114** (1), 28 (2013).
9. V. M. Gradov, S. V. Gavrish, and I. V. Rudakov, Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Priborostroyeniye, No. 6, 130 (2017). DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-130-145
10. V. M. Gradov and A. A. Shcherbakov, Opt. Spektrosc. **47** (4), 635 (1979).
11. V. M. Gradov, V. V. Ivanov, Yu. I. Terentyev, and A. A. Shcherbakov, TVT **19** (1), 28 (1981).
12. V. M. Gradov, Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii, No. 1 (1), 110 (2012). DOI: 10.18698/2308-6033-2012-1-21.
13. E. B. Saloman, J. Phys. Chem. Ref. Data. **33** (3), 765 (2007).