

УДК 537.52  
EDN: ZTDECF

PACS: 52.80.-s



## Выбор оптимальных режимных параметров импульсных ксеноновых ламп для медико-биологических и экологических применений

Л. Ю. Володин, А. С. Камруков, А. В. Кондратьев

*Предложен подход к определению оптимальных режимных параметров трубчатых импульсных ксеноновых ламп, обеспечивающих приемлемые для актуальных медико-биологических и экологических применений спектрально-энергетические и ресурсные характеристики ламп. Подход базируется на фундаментальных представлениях о физике сильнотоочных импульсных разрядов в газах и результатах экспериментальных и хорошо апробированных теоретических исследований импульсных ксеноновых ламп. Показано, что оптимальные режимные параметры определяются конструктивными параметрами лампы и поверхностной плотностью электрической мощности разряда, рекомендуемые значения которой для вышеуказанных применений составляют  $60 \pm 15$  кВт/см<sup>2</sup>. Представлены результаты экспериментальных исследований основных электротехнических, спектрально-энергетических и ресурсных характеристик стандартной импульсной ксеноновой лампы в режиме, соответствующем разработанным рекомендациям.*

*Ключевые слова:* импульсная ксеноновая лампа, оптимальные режимные параметры, спектральные характеристики, яркостная температура, ресурс работы.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-2-201-214

### Введение

В настоящее время импульсные ксеноновые лампы (ИКЛ) рассматриваются как весьма перспективный инструмент для решения актуальных задач повышения биобезопасности

объектов окружающей среды и гражданской инфраструктуры. Они используются в медицинских учреждениях в системах экспресс-обеззараживания воздуха и поверхностей [1, 2], что существенно снижает риски внутрибольничной инфекции [3], в физиотерапии – для лечения ран и дерматозов [4, 5], в пищевой промышленности – для обеззараживания упаковочной тары [6] и нетермической антимикробной обработки пищевых продуктов [7, 8], в экологических установках обеззараживания питьевой воды [9, 10] и фотохимической очистки сточных вод [11–14] и др. Высокая биоцидная и фотохимическая эффективность ИКЛ обусловлена сплошным эмиссионным спектром, непрерывно перекрывающим широкую спектральную область – от ультрафиолетового (УФ) до инфракрасного

---

**Володин Лев Юрьевич**, ведущий инженер.  
**Камруков Александр Семенович**, зав. отделом, к.т.н., доцент.  
E-mail: kamrukov@mail.ru  
**Кондратьев Андрей Валерьевич**, научный сотрудник.  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет).  
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1.

Статья поступила в редакцию 3.03.2024  
После доработки 14.03.2024  
Принята к публикации 19.03.2024  
Шифр научной специальности: 1.3.14

© Володин Л. Ю., Камруков А. С., Кондратьев А. В., 2024

диапазонов (200–1500 нм) и высокой интенсивностью излучения, на несколько порядков превышающей интенсивность традиционных источников излучения, применяемых в медицинской и санитарной практике – ртутных бактерицидных ламп и светодиодов [15, 16]. При этом определяющее значение для перечисленных выше применений играет относительный и абсолютный выход излучения ламп в коротковолновой УФ-области  $\Delta\lambda = 200\text{--}300$  нм, где, как правило, достигаются максимальные эффективности биоцидного и фотохимического действия УФ-излучения.

Выбор оптимальных режимных параметров ИКЛ, при которых обеспечиваются приемлемые для медико-биологических и экологических применений технические и эксплуатационные характеристики, не является тривиальным. Это связано с тем, что имеющиеся на сегодняшний день рекомендации по рабочим параметрам ИКЛ [17, 18] относятся в основном к ранее рассматриваемым применениям таких ламп как источников освещения (фотовспышки, сигнальные огни и т. п.) и источников накачки лазеров (в первую очередь, твердотельных – рубиновых и неодимовых). Эти применения требовали оптимизации режимов ламп, обеспечивающих повышенный выход излучения в видимой области спектра ( $\Delta\lambda = 400\text{--}780$  нм). Характерные эффективные температуры излучения ламп при этом близки к солнечным и составляют  $\sim 5500\text{--}6000$  К; соответственно, выход коротковолнового УФ-излучения в таких режимах мал, и эти режимы не могут рассматриваться как оптимальные для медико-биологических и экологических применений. Стремление повысить спектральный выход излучения ИКЛ в коротковолновой УФ-области требует увеличения температуры излучающей плазмы, что достигается повышением уровня удельного (в единицу объема плазмы) энерговыклада, а это, в свою очередь, повышает энергонапряженность конструкции лампы и катастрофически снижает ресурс ее работы.

Поиску компромиссного решения и обоснованию режимных параметров трубчатых ИКЛ, обеспечивающих приемлемые для новых применений спектрально-энергетические и ресурсные характеристики ламп, и посвящена настоящая работа.

### Общие принципы выбора оптимальных режимов работы трубчатой импульсной ксеноновой лампы

Рассмотрим общие принципы выбора оптимального режима работы трубчатой импульсной ксеноновой лампы.

В качестве исходных данных примем следующие конструктивные параметры лампы:

- внутренний диаметр колбы лампы –  $d$ , см;
- межэлектродное расстояние –  $l$ , см;
- начальное давление ксенона в лампе –  $P_0$ , мм рт. ст.<sup>1</sup>.

Требуется определить электрическую энергию вспышки (энергию, запасаемую в конденсаторе)  $W_0$  (Дж), характерное время выделения энергии в разрядном контуре  $\tau_{0,5}$  (с) и параметры самого электротехнического контура – емкость конденсатора  $C$  (Ф), зарядное напряжение  $U$  (В) и суммарную индуктивность  $L$  (Гн), обеспечивающие приемлемый компромисс между спектральными характеристиками излучения в коротковолновой УФ-области спектра и ресурсом лампы.

### Яркостные характеристики ИКЛ

Яркостные характеристики ИКЛ (эффективная или радиационная температура излучения, яркостные температуры излучения в различных областях спектра) определяются, в первую очередь, электрической мощностью, вкладываемой в лампу, и ее световыми габаритами (диаметром и длиной тела свечения). Действительно, эффективную температуру излучения лампы  $T_{\text{эфф}}$  можно оценить из уравнения

$$\sigma_{\text{СБ}} T_{\text{эфф}}^4 = \eta_{\text{излП}} \cdot \frac{P_{\text{л}}}{\pi dl} = \eta_1 \cdot \eta_{\text{пл}} \cdot \eta_{\text{излП}} \cdot P_{\text{л}},$$

где  $\sigma_{\text{СБ}} = 5,67 \cdot 10^{-12}$  Вт/(см<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана;  $P_{\text{л}}$  – электрическая мощ-

<sup>1</sup> Стандартное давление в трубчатых ксеноновых лампах составляет 400 мм рт. ст.; пониженное давление – 200–250 мм рт. ст. – облегчает поджиг лампы, практически не влияет на спектрально-энергетические характеристики лампы, но способствует более интенсивному распылению электродов, как правило, применяется для крупногабаритных ламп ( $l \geq 20$  см); для малогабаритных ламп ( $l \leq 6$  см,  $d \leq 0,5$  см) часто используют повышенное давление ксенона – 600–800 мм рт. ст.).

ность, вкладываемая в лампу;  $\eta_{излP}$  – эффективность преобразования вкладываемой электрической мощности в излучение<sup>2</sup>;  $\eta_1$  – доля электрической энергии, вкладываемой в лампу в первом полупериоде разряда при колебательном режиме тока ( $\eta_1 = 1$  при критическом и закритическом режимах разряда);  $\eta_{пл}$  – эффективность передачи запасенной электрической энергии в лампу ( $\eta_{пл} = \frac{R_{л}}{R_{л} + R_0}$ , где  $R_{л}$  –

эффективное омическое сопротивление лампы;  $R_0$  – омическое сопротивление контура);  $P_s$  – плотность электрической мощности разряда, отнесенная к площади боковой излучающей поверхности лампы:

$$P_s = \frac{W_0}{\pi \cdot d \cdot l \cdot \tau_{0,5}}$$

Тогда

$$T_{эфф} = \left( \frac{\eta_1 \eta_{пл} \eta_{излP}}{\sigma_{СБ}} \cdot P_s \right)^{0,25} \approx (540 \pm 30) \cdot P_s^{0,25}. \quad (1)$$

Здесь приняты характерные значения  $\eta_1 \cdot \eta_{пл} = 0,75-0,95$ ; и  $\eta_{излP} = 0,5-0,7$ . Соотношение (1) позволяет оценить требуемый уровень энергетических характеристик электро-

<sup>2</sup> Эффективность преобразования вкладываемой электрической мощности в излучение  $\eta_{излP}$  связана с КПД излучения лампы  $\eta_{изл} = \frac{W_{изл}}{W_0}$  ( $W_{изл}$  – энергия излучения) соотношением

$$\eta_{излP} = \eta_{изл} \cdot \frac{1}{\eta_1 \cdot \eta_{пл}} \cdot \frac{\tau_{0,5}}{\tau_{эфф}},$$

которое следует из очевидного равенства

$$P_{изл} = \eta_{излP} \cdot P_{л} = \eta_{излP} \cdot \frac{\eta_1 \cdot \eta_{пл} \cdot W_0}{\tau_{0,5}} \equiv \eta_{изл} \cdot \frac{W_0}{\tau_{эфф}},$$

где  $\tau_{эфф}$  – эффективная длительность импульса интегрального по спектру излучения (обычно  $\tau_{эфф} \approx (1,3-1,5)\tau_{0,5}$ ). При характерных значениях  $\eta_1 \cdot \eta_{пл} \approx 0,75-0,95$  имеем  $\eta_{излP} \approx (0,7-1,0)\eta_{изл}$ , т. е., как правило, эффективность преобразования вкладываемой электрической мощности в излучение меньше эффективности конверсии запасенной электрической энергии в излучение, но это различие в оптимизированных контурах не очень существенно. Поэтому для приближенных оценок можно принять  $\eta_{излP} \approx \eta_{изл}$ .

технического контура для достижения заданного уровня эффективных температур излучения лампы.

Спектральное распределение излучения ИКЛ, как следует из многочисленных экспериментов [18, 19], близко к планковскому, поэтому яркостные температуры в коротковолновой УФ-области не должны заметно отличаться от эффективной температуры излучения лампы. Действительно, согласно проведенным измерениям, яркостная температура ИКЛ в коротковолновой УФ-области спектра (измерения выполнены на длине волны  $\lambda = 256$  нм) в достаточно широком диапазоне изменения начальных параметров разрядного контура и лампы описываются приближенным выражением

$$T_{УФ} \approx (720 \pm 20) \cdot P_s^{0,22}, \quad (2)$$

которое в актуальном диапазоне  $P_s$  дает значения яркостных температур ламп в УФ-области, на несколько процентов меньшие по сравнению со значениями эффективных температур излучения, рассчитанные по (1).

На рисунке 1 представлена зависимость спектрального КПД абсолютно черного тела (АЧТ) в области  $\Delta\lambda = 200-300$  нм от температуры, откуда следует, что максимальное значение спектрального КПД АЧТ составляет  $\sim 29\%$  и достигается при температурах  $T \approx 15000$  К, см. врезку). Полагая эффективность преобразования электрической энергии в излучение трубчатых ксеноновых ламп  $\eta_{изл} \approx 0,5$ , получим теоретическую оценку максимального значения КПД ИКЛ в биоцидной области  $\Delta\lambda = 200-300$  нм, равного  $\eta_{\Delta\lambda} \approx 15\%$ . Однако достичь таких яркостных температур в стандартных трубчатых ИКЛ если и возможно, то только в исключительно форсированных режимах с ультракороткой (микросекундной) длительностью импульсов и использованием высоких рабочих напряжений. Как будет показано ниже, уже при температурах, больших  $8500$  К, лампа работает в достаточно жестких режимах (обычно в режимах короткой длительности), что существенно снижает ресурс ее работы.

С другой стороны, при яркостных температурах излучения, заметно меньших  $7500$  К, спектральный выход коротковолнового УФ-

излучения быстро уменьшается, и такие режимы становятся малоэффективными с точки зрения генерации биоцидного излучения.

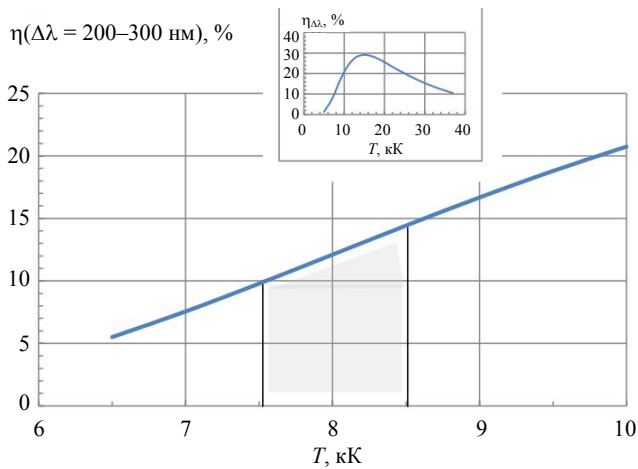


Рис. 1. Спектральный КПД абсолютно черного тела в области  $\Delta\lambda = 200\text{--}300$  нм в функции температуры

Таким образом, предпочтительным диапазоном яркостных температур трубчатых ИКЛ для медико-биологических и экологических применений является диапазон

$$T_{\text{уф}} = 7500\text{--}8500 \text{ K}, \quad (3)$$

при котором возможно достижение спектральных КПД в биоцидной области  $\Delta\lambda = 200\text{--}300$  нм  $\eta_{\Delta\lambda}^* = \frac{W_{\Delta\lambda}}{W_{\text{изл}}} \approx 12 \pm 2\%$  и значений

абсолютных КПД ИКЛ в этой области  $\eta_{\Delta\lambda} = \frac{W_{\Delta\lambda}}{W_0} \approx 6 \pm 1\%$ . Реальные КПД могут не-

значительно отличаться от данной оценки из-за отличия эмиссионного спектра лампы от спектра АЧТ и несколько других значений  $\eta_{\text{изл}}$ .

Используя (2) и (3), получим требуемый диапазон значений поверхностной плотности мощности разряда  $P_s$ , при котором реализуются рекомендуемые выше яркостные температуры УФ-излучения ИКЛ

$$P_s \approx \left(\frac{T_{\text{уф}}}{720}\right)^{4,55} \approx \left(\frac{8000 \pm 500}{720}\right)^{4,55} \approx (60 \pm 15) \cdot 10^3 \text{ Вт / см}^2. \quad (4)$$

Характерное время выделения энергии в разрядном контуре  $\tau_{0,5}$  определим из условия обеспечения приемлемой долговечности лампы.

### Ресурсные характеристики трубчатых ИКЛ

Ресурс импульсной лампы определяется максимальным числом вспышек, которое выдерживает лампа без разрушения и при котором обеспечивается допустимый уровень снижения ее излучательных характеристик в актуальном спектральном диапазоне, например, в два раза.

Разрушение лампы происходит вследствие превышения импульсного давления плазмы ударной прочности кварцевой колбы лампы. Предельная электрическая энергия, при которой лампа выдерживает несколько вспышек, согласно экспериментам, определяется выражением [20]

$$W_{\text{пред}} \approx 12 \cdot 10^3 \cdot d \cdot l \cdot \sqrt{\tau_{0,32}}, \quad (\text{Дж}),$$

где  $\tau_{0,32}$  – длительность (сек) светового импульса по уровню 0,32 от максимальной интенсивности. Используя приближенное соотношение для характерных времен типичного импульса излучения трубчатых ламп [19]

$$\tau_{0,32} \approx (1,25\text{--}1,3)\tau_{0,5},$$

получим

$$W_{\text{пред}} \approx 13,5 \cdot 10^3 \cdot d \cdot l \cdot \sqrt{\tau_{0,5}}, \quad (\text{Дж}).$$

Отношение энергии, запасаемой в накопительном конденсаторе  $W_0$ , к предельной электрической энергии импульса  $W_{\text{пред}}$ , начиная с которой лампа разрушается, называется фактором нагрузки [18, 19, 21]

$$\beta = \frac{W_0}{W_{\text{пред}}}.$$

Фактор нагрузки  $\beta$  можно выразить через поверхностную плотность электрической мощности лампы  $P_s$

$$\beta \approx 2,3 \cdot 10^{-4} \cdot P_s \cdot \sqrt{\tau_{0,5}}. \quad (5)$$

Согласно экспериментальным данным, максимальный ресурс лампы, определяемый из прочностных соображений, составляет в числе импульсов  $N$  [21]

$$N \approx \beta^{-8,5}. \quad (6)$$

Однако реальный ресурс ИКЛ определяется, как правило, процессами оптической деградации кварцевой колбы лампы (запылением продуктами эрозии электродов и плазмохимических реакций, радиационным окрашиванием и др.), и может отличаться от рассчитанного по (6) в  $10\text{--}10^3$  раз. Тем не менее, ресурс, рассчитанный по (6), можно рассматривать как теоретическую оценку долговечности лампы сверху (больше ресурс быть не может). При малых значениях фактора нагрузки ( $\beta < 0,1$ ) теоретический ресурс лампы может быть очень большим, однако лампа при этом работает в сильно недогруженном режиме, и эффективность конверсии электрической энергии в излучение резко падает из-за возрастания роли безызлучательных диссипативных потерь энергии [18–22].

Из этих соображений выбираем диапазон приемлемых значений фактора нагрузки

$$\beta = 0,1\text{--}0,15;$$

при котором максимально возможные наработки лампы в импульсах составляют  $\sim 300$  миллионов и  $\sim 10$  миллионов соответственно.

Тогда из (5) получаем ограничение сверху на длительность импульса энерговыделения

$$\tau_{0,5\max} \leq 1,89 \cdot 10^7 \cdot \frac{\beta^2}{P_s^2}. \quad (7)$$

Для установленного выше диапазона требуемых значений  $P_s = 45\text{--}75$  кВт/см<sup>2</sup> имеем ограничения на длительность импульса энерговыделения  $\tau_{0,5\max} \approx 210\text{--}75$  мкс соответственно. При эффективных температурах излучения ИКЛ  $T_{\text{эфф}} \geq 9000$  К теоретически приемлемый ресурс можно обеспечить только в режимах коротких импульсов  $\tau_{0,5\max} \leq 40$  мкс.

### Условие заполнения канала ИКЛ

Характерное время выделения энергии в разрядном контуре  $\tau_{0,5}$ , близкое к длительности токового фронта  $\tau_m$ , должно превышать характерное время заполнения плазмой всего сечения колбы лампы  $\tau_{\text{зап}}$ . В противном случае

существенно снижается эффективность преобразования электрической энергии в излучение (из-за падения плотности плазмы в разрядном канале).

Скорость расширения плазменного канала  $V$  (см/с) определяется выражением, полученным из теории автомодельного решения задачи о расширении цилиндрического канала при мгновенном энерговыделении [19]

$$\begin{aligned} V &\approx 110 \cdot \left( \frac{P_{\text{л}}}{\tau_m \cdot l} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{400}{P_0} \right)^{0,25} \approx \\ &\approx 10^2 \cdot \left( \frac{W_0}{\tau_{0,5}^2 \cdot l} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{400}{P_0} \right)^{0,25}. \end{aligned} \quad (8)$$

Плазменный канал заполняет все сечение лампы к максимуму тока, если

$$\tau_m (\approx \tau_{0,5}) \geq \frac{d}{V}.$$

Откуда имеем критерий заполнения канала лампы

$$\zeta \approx 133 \cdot \left( \frac{400}{P_0} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{\tau_{0,5}}{d} \right)^{0,75} \cdot P_s^{0,25} \geq 1. \quad (9)$$

Из (9) получаем нижнюю оценку длительности импульса энерговыделения при заданном значении  $P_s$

$$\tau_{0,5\min} = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d}{P_s^{1/3}} \cdot \left( \frac{P_0}{400} \right)^{1/3}. \quad (10)$$

В [18] и [22] приводятся эмпирические формулы для оценки скорости расширения плазмы и времени заполнения разрядного канала в зависимости от размеров лампы и параметров контура, которые дают близкие к рассчитанным по (8) и (10) значения.

Таким образом, диапазон рекомендуемых значений характерной длительности импульса энерговыделения составляет

$$\begin{aligned} 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d}{P_s^{1/3}} \cdot \left( \frac{P_0}{400} \right)^{1/3} &\leq \tau_{0,5} \leq \\ &\leq 1,89 \cdot 10^7 \cdot \frac{\beta^2}{P_s^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

### Параметры электротехнического контура

С учетом (11) определяем возможный диапазон электрической энергии импульса  $W_0 = P_s \cdot \pi d l \cdot \tau_{0,5}$

$$4,7 \cdot 10^{-3} \cdot d^2 \cdot l \cdot P_s^{2/3} \cdot \left(\frac{P_0}{400}\right)^{1/3} \leq W_0 \leq 5,9 \cdot 10^7 \cdot \frac{d \cdot l \cdot \beta^2}{P_s} \quad (12)$$

Параметры электротехнического контура – емкость конденсатора  $C$ , зарядное напряжение  $U$  и суммарную индуктивность  $L$  – определяем из условия его оптимального согласования с лампой.

При учете нелинейности сопротивления лампы ( $R_{\text{л}} \sim I^{-0,5}$ , где  $I$  – разрядный ток в лампе) условие оптимального режима работы лампы достигается при значении нелинейного аналога параметра затухания [19, 22, 23]

$$\alpha = \frac{K_0}{\sqrt{U \cdot Z}} \approx 0,8 \quad (13)$$

где  $K_0$  – конструктивный параметр лампы [24]

$$K_0 = 1,27 \cdot \frac{l}{d} \cdot \left(\frac{P_0}{450}\right)^{0,2};$$

$Z$  – волновое сопротивление контура (Ом)

$$Z = \sqrt{L/C}.$$

При  $\alpha < 0,8$  реализуются режимы с докритическим затуханием тока, сопровождающиеся переполюсовкой электродов, что приводит к снижению эффективности передачи энергии в лампу в основной (излучающей) фазе разряда и повышенному износу электродной системы. При  $\alpha \gg 0,8$  разряд осуществляется в режимах закритического затухания, при которых импульсы тока сильно затянуты по времени, что приводит к снижению пиковой мощности контура и уменьшению температуры плазмы и КПД излучения.

В диапазоне  $\alpha = 0,5-2$  характерная длительность выделения энергии  $\tau_{0,5}$  (с) составляет [19, 23]

$$\tau_{0,5} \approx (2 \pm 0,1) \sqrt{LC}.$$

Откуда получаем оценку полной индуктивности разрядного контура

$$L \approx \frac{\tau_{0,5}^2}{4C}.$$

С учетом (13) и выражения для энергии, запасаемой в конденсаторной батарее –  $W_0 = \frac{C \cdot U^2}{2}$ , нелинейный аналог параметра затухания  $\alpha$  можно представить как

$$\alpha = K_0 \left(\frac{2 \cdot C^3}{W_0 \cdot \tau_{0,5}^2}\right)^{1/4} \approx 1,51 \cdot \frac{l}{d} \cdot \left(\frac{C^3}{W_0 \cdot \tau_{0,5}^2}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{P_0}{450}\right)^{1/5} \quad (14)$$

Из условия оптимального электротехнического согласования лампы и контура ( $0,8 \leq \alpha \leq 1,2$ ) из (14) получаем выражение для оценки емкости конденсаторной батареи

$$0,43 \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^{4/3} \cdot (W_0 \cdot \tau_{0,5}^2)^{1/3} \cdot \left(\frac{450}{P_0}\right)^{4/15} \leq C \leq 0,74 \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^{4/3} \cdot (W_0 \cdot \tau_{0,5}^2)^{1/3} \cdot \left(\frac{450}{P_0}\right)^{4/15} \quad (15)$$

После выбора емкости конденсатора определяется его зарядное напряжение

$$U = \left(\frac{2W_0}{C}\right)^{1/2}.$$

При выборе эксплуатационных режимов работы ИКЛ максимальная частота следования импульсов  $f_{\text{max}}$  ограничивается предельной плотностью средней электрической мощностью лампы  $P_{\text{ср}}^* = W_0 \cdot f$ , зависящей от условий охлаждения,

$$f_{\text{max}} = P_{\text{ср}}^* \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}} \cdot l}{W_0},$$

где  $d_{\text{нар}}$  – наружный диаметр колбы лампы;  $P_{\text{ср}}^* = 15 \text{ Вт/см}^2$  при воздушном охлаждении в условиях естественной конвекции,  $30 \text{ Вт/см}^2$  –

при принудительном воздушном охлаждении и  $200 \text{ Вт/см}^2$  – при жидкостном охлаждении лампы [19].

В таблице представлены результаты расчетов рекомендуемых режимных параметров импульсной лампы ИНП-7/120 ( $d = 0,7 \text{ см}$ ,  $l = 12 \text{ см}$ ,  $P_0 = 220 \text{ мм рт. ст.}$ ) обеспечивающих яркостную температуру в коротковолновой УФ области спектра  $T_{256} \approx 8500 \text{ К}$ . Фактор

нагрузки принимался равным  $\beta = 0,115$  и соответствовал максимально возможному (теоретическому) ресурсу лампы  $10^8$  импульсов. При яркостной температуре  $8500 \text{ К}$  КПД излучения лампы  $\eta_{\Delta\lambda}$  в области  $\Delta\lambda = 200\text{--}300 \text{ нм}$ , рассчитанный по спектральному КПД АЧТ с учетом эффективности преобразования запасенной электрической энергии в излучение  $\eta_{\text{изл}} = 0,5$ , составляет  $\eta_{\Delta\lambda} \approx 7 \%$ .

Таблица

**Рекомендуемые режимные параметры импульсной лампы ИНП-7/120, обеспечивающие яркостную температуру в УФ-области спектра  $T_{\text{УФ}} \approx 8500 \text{ К}$**

Плотность электрической мощности, $P_s$ , $\text{кВт/см}^2$	Длительность импульса мощности, $\tau_{0,5}$ , мкс		Запасаемая электрическая энергия, $W_0$ , Дж		Емкость конденсаторной батареи, $C$ , мкФ		Индуктивность контура, $L$ , мкГн	
	min	max	min	max	min	max	min	max
74,7	20	45	40	88	66	114	4	30

Примечание:  $d = 0,7 \text{ см}$ ,  $l = 12 \text{ см}$ ,  $P_0 = 220 \text{ мм рт. ст.}$ ,  $\beta = 0,115$ .

### Экспериментальное исследование спектрально-энергетических и ресурсных характеристик ИКЛ

Ниже приводятся результаты экспериментального исследования спектрально-энергетических и ресурсных характеристик импульсной ксеноновой лампы ИНП-7/120 (производство ООО «Ридер», начальное давление ксенона  $P_0 = 220 \text{ мм рт. ст.}$ ) с режимными параметрами, выбранными в соответствии с данными рекомендациями: запасаемая электрическая энергия задавалась равной  $W_0 = 90 \text{ Дж}$ , емкость конденсаторной батареи –  $C = 80 \text{ мкФ}$ , соответственно, зарядное напряжение  $U = 1500 \text{ В}$ . Инициирование разряда в лампе осуществлялось по схеме последовательного поджига [18, 19], для чего в разрядный контур последовательно с лампой подключалась вторичная обмотка повышающего импульсного трансформатора. Дежурная дуга в описываемых экспериментах не применялась. Индуктивность разрядного контура составляла  $L \approx 6 \text{ мкГн}$ .

### Методики измерений и аппаратура

Электротехнические характеристики лампы определялись с помощью токового датчика Pearson 4418 (коэффициент чувствительность

$1 \text{ кА/В}$ ) и высоковольтного частотно-скомпенсированного делителя напряжения (высоковольтного щупа) АКТАКОМ АСА 6039 (коэффициент деления 1:1000). Для регистрации сигналов использовался двухканальный осциллограф Tektronix TDS1002B.

Измерение спектрально-энергетических и яркостных характеристик излучения лампы выполнено с помощью фотоэлектронного преобразователя (ФЭП) «Спектр-01К» [25], состоящего из набора калиброванных узкополосных фотоэлектрических приемников, регистрирующих излучение в 4-х спектральных интервалах с центрами на длинах волн  $256 \pm 14 \text{ нм}$ ,  $456 \pm 30 \text{ нм}$ ,  $546 \pm 42 \text{ нм}$  и  $1024 \pm 66 \text{ нм}$ . Абсолютная калибровка измерительных каналов проводилась в федеральном бюджетном учреждении «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Москве и Московской области» (ФБУ «Ростест-Москва»). Регистрация сигналов осуществлялась четырехканальным осциллографом Tektronix TDS2014C.

Спектры излучения лампы в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм регистрировались широкодиапазонным оптоволоконным спектрометром Solar S100 на основе дифракционной решетки 300 штр/мм и датчика изображения S8378-1024 производства компании Hamamatsu. Спектральное разрешение спек-

трома – 1,5 нм. Для сбора излучения использовалось кварцевое оптическое волокно ( $\varnothing$  600 мкм,  $\Delta\lambda = 200\text{--}1100$  нм) и косинусный корректор Ocean Optics CC-3-UV-S. Калибровка по длинам волн выполнялась при помощи ртутно-аргоновой лампы низкого давления и базы данных по спектральным линиям NIST ASD. Совместная калибровка оптической системы спектрометра с оптическим волокном и косинусным корректором по абсолютной спектральной чувствительности проводилась с использованием эталонного источника излучения DH-3P-CAL (производитель – Ocean Optics), в состав которого входили дейтериевая ( $\Delta\lambda = 200\text{--}400$  нм) и галогеновая лампы ( $\Delta\lambda = 400\text{--}1100$  нм).

Динамика снижения спектрально-энергетических характеристик излучения импульсной ксеноновой лампы ИНП-7/120 в УФ-области ( $\Delta\lambda = 200\text{--}300$  нм) исследовалась в ходе предварительных ресурсных испытаний в течение наработки лампой  $10^6$  разрядных импульсов. Лампа устанавливалась на оси цилиндрической кварцевой камеры диаметром 80 мм, через которую в циркуляционном режиме прокачивалась дистиллированная вода с расходом  $\sim 250$  л/час. Лампа работала с частотой 2 Гц, средняя электрическая мощность лампы составляла 180 Вт. Периодический контроль коэффициентов пропускания циркулирующей в системе воды проводился при помощи спектрофотометра ПЭ 3000 УФ. В процессе исследований коэффициент пропускания воды на  $\lambda = 265$  нм составлял  $0,070 \pm \pm 0,005 \text{ см}^{-1}$ . Полная смена воды во всей системе проводилась каждые 175 000 отработанных импульсов ( $\sim 24$  часа).

Мониторинг потока коротковолнового УФ-излучения в процессе работы импульсной лампы осуществлялся с помощью фотоприемника TOCON C8 со встроенным усилителем. Область спектральной чувствительности приемника соответствует диапазону длин волн с максимумом на  $\lambda \approx 256$  нм и полушириной  $\sim 35$  нм. Регистрация сигнала с фотоприемника в процессе испытаний проводилась осциллографом Tektronix TDS 1002B с усреднением по 16 импульсам.

Непрерывная работы лампы обеспечивалась от 4 до 8 часов в течение рабочего дня с

возможными остановками не более чем на 30 минут. В процессе испытаний (не реже одного раза в неделю) производилось обслуживание экспериментального стенда. Лампа извлекалась из реактора, производился ее визуальный осмотр и регистрация спектра излучения на оптическом стенде.

По окончании испытаний строилась зависимость относительного снижения потока УФ-излучения ( $I_i/I_0$ ) от количества отработанных импульсов  $N_i$ .

### **Результаты экспериментов и их обсуждение**

На рисунке 2 представлены результаты обработки электротехнических характеристик импульсного разряда в лампе (ток и мощность, вкладываемая в разряд). Разрядный ток носил аperiodический характер с максимумом, равным  $I_{\max} = 1725$  А и длительностью по уровню  $0,5 I_{\max} \sim 56$  мкс (рис. 2а). Пиковая электрическая мощность лампы составляла  $P_{\text{пл}} \approx 1,62$  МВт, контура –  $P_{\text{к}} \approx 2,05$  МВт при длительности импульсов энерговыделения на полувысоте  $\tau_{0,5} \approx 44$  мкс (рис. 2б). Таким образом, в разряд вкладывалась электрическая энергия  $W_{\text{пл}} \approx P_{\text{пл}} \cdot \tau_{0,5} \approx 71$  Дж или  $\sim 80$  % запасаемой энергии. Эффективное сопротивление лампы  $\sim 0,54$  Ом. В экспериментальных условиях фактор нагрузки составлял  $\beta = 0,118$ , нелинейный аналог параметра затухания  $\alpha = 1,07$ .

В течение всего периода ресурсных испытаний амплитудные значения разрядного тока и пиковой мощности, вкладываемой в разряд, практически не изменялись и после наработки лампой  $10^6$  импульсов отличались не более чем на 0,5 % от начальных (рис. 2); частота разрядных импульсов сохранялась в пределах  $f = 2,00 \pm 0,08$  Гц, что в целом свидетельствует о высокой стабильности электротехнических характеристик лампы ИНП 7/120 в процессе проведенных испытаний.

На рисунках 3 и 4 представлены спектрально-энергетические характеристики излучения лампы ИНП 7/120 в начале испытаний и после отработки  $10^6$  импульсов, полученные с помощью спектрометра Solar S100 при измерениях лампы на оптическом стенде.



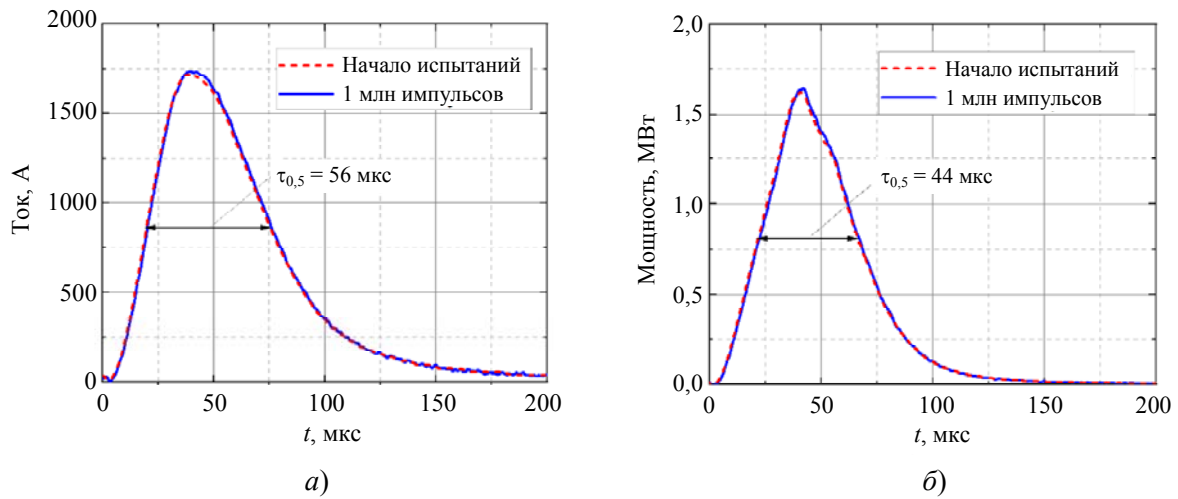


Рис. 2. Электротехнические характеристики лампы ИПП 7/120 до и после проведения испытаний: (а) ток; (б) мощность

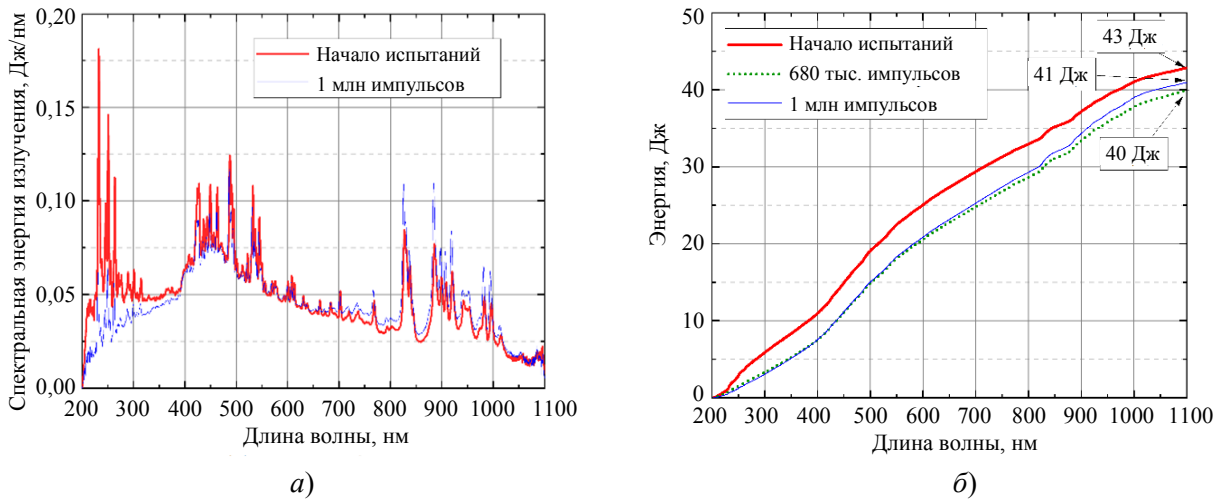


Рис. 3. Спектрально-энергетические характеристики лампы ИПП 7/120 при различном количестве обработанных импульсов: (а) спектральная плотность энергии излучения в диапазоне 200–1100 нм; (б) интеграл спектральной плотности энергии излучения в диапазоне 200–1100 нм

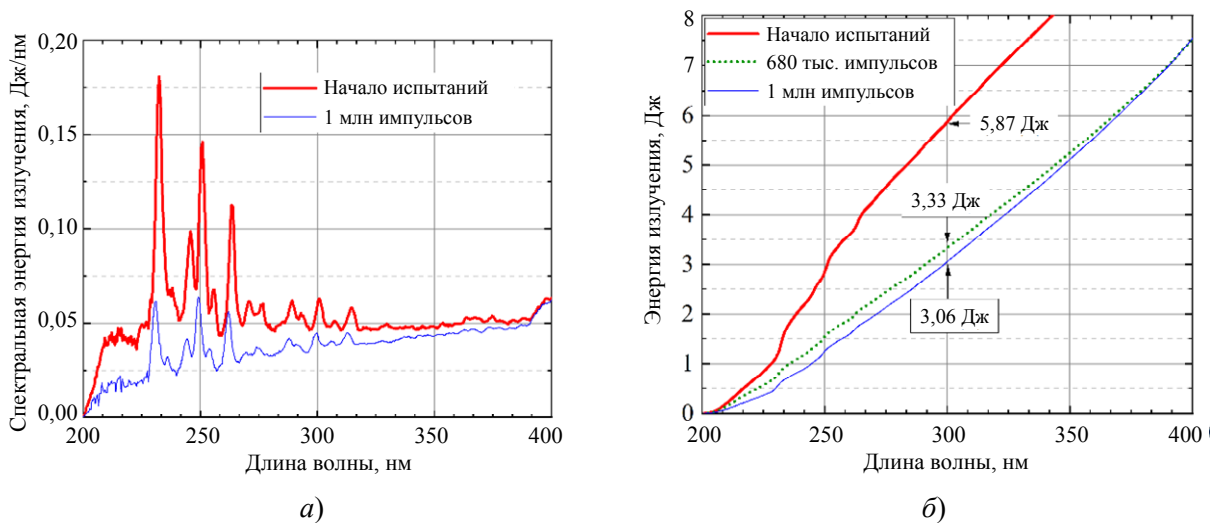


Рис. 4. Спектрально-энергетические характеристики лампы ИПП 7/120 в УФ-области спектра при различном количестве обработанных импульсов: (а) спектральная плотность энергии излучения в диапазоне 200–400 нм; (б) интеграл спектральной плотности энергии излучения в диапазоне 200–400 нм

Интегрирование экспериментальных спектров по длинам волн от 200 нм до  $\lambda_i$  позволяет определить энергетический выход излучения в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda = 200-\lambda_i$ ; результаты представлены на рисунках 3б и 4б. В исходном состоянии лампа области  $\Delta\lambda = 200-1100$  нм излучает 43 Дж или  $\sim 48\%$  от запасаемой электрической энергии ( $\sim 60\%$  от вложенной); эффективная температура излучения составляет  $T_{эфф} \approx 8900$  К. После одного миллиона импульсов интегральная излучаемая энергия уменьшилась до 40 Дж или на  $\sim 7\%$  (рис. 3б).

Значения энергии УФ-излучения в диапазоне  $\Delta\lambda = 200-300$  нм перед испытаниями составляли  $\sim 5,9$  Дж (рис. 4б), что соответствовало КПД преобразования энергии, запасаемой в конденсаторной батарее, в коротко-

волновое УФ-излучение  $\eta_{200-300} \approx 6,5\%$ . Яркостная температура излучения лампы в спектральной полосе  $\lambda = 256 \pm 14$  нм, измеренная ФЭП «Спектр-01К», составила  $T_{256} \approx 8550$  К, что достаточно хорошо согласуется со средней яркостной температурой в диапазоне  $\Delta\lambda = 200-300$  нм, полученной при обработке измерений спектрометром  $T_{200-300} \approx 8700$  К).

К концу предварительных ресурсных испытаний при отработке  $10^6$  разрядных импульсов энергия коротковолнового УФ-излучения лампы снизилась до  $\sim 3,1$  Дж (рис. 4б) или примерно в два раза (до 52% от начального значения) с падением КПД до 3,4%. Спектрометрические данные по снижению УФ-потока коррелируют с данными, полученными при мониторинге с помощью узкополосного УФ-приемника TOCON C8 (рис. 5).

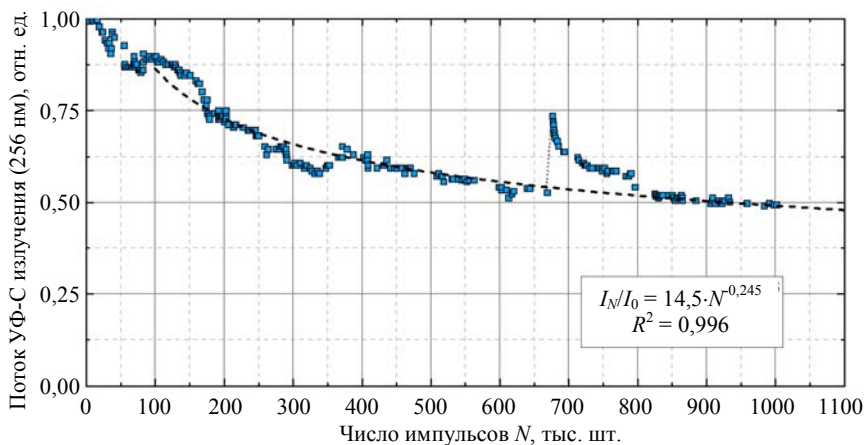


Рис. 5. Зависимость потока коротковолнового УФ-излучения ( $\lambda_{max} = 256$  нм,  $\Delta\lambda_{0,5} \sim 35$  нм) от числа разрядных импульсов

Как показывает визуальный анализ состояния лампы, в процессе ее работы происходит потемнение кварцевой колбы – на внутренней поверхности образуется налет (пленка) желто-коричневого цвета. Его образование обусловлено деградацией кварца при термо- и фотохимических реакциях с разрядной плазмой и распылением электродов. При работе лампы в условиях водяного охлаждения запыление колбы происходит достаточно равномерно. Если лампа работает в воздухе реализуется режим конвективного охлаждения (в нашем случае – во время измерений на оптическом стенде), и налет на внутренней поверхности кварцевой колбы лампы образуется в виде отдельных пятен, положение которых может меняться в зависимости от пространственной ориентации лампы, наличия дополнительных

конструктивных элементов (например, намотанной на лампу проволоки, увеличивающей емкость межэлектродного промежутка), температуры колбы и др.

Как видно из рисунка 5, первые  $\sim 340$  тысяч импульсов снижение УФ-потока происходит с приблизительно постоянной скоростью  $\sim 13\%/100$  тысяч импульсов до  $\sim 60\%$  от начального значения, после чего скорость деградации существенно замедляется.

Скачок потока УФ-излучения в районе 680 тысяч импульсов и дальнейшее изменение характера снижения потока произошли после 5 минутной работы ( $\sim 600$  импульсов) лампы на воздухе, в процессе проведения измерений спектра излучения. Рост потока УФ-излучения, вероятно, обусловлен перераспределением продуктов плазмохимических реакций,

образующих поглощающую пленку на внутренней поверхности колбы лампы.

Последние 100 тыс. импульсов (с 900 тысяч до 1 миллиона) скорость снижения потока уменьшалась до ~ 1,3 % за 100 тысяч импульсов. Снижение потока УФ-излучения при отработке 1 миллиона импульсов достигало ~ 50 %.

Аппроксимация экспериментальной кривой снижения потока УФ-излучения степенной функцией дает следующую зависимость относительного спада излучения от числа импульсов (при  $N \geq 10^5$ )

$$\frac{I_N}{I_0} \approx 14,5 \cdot N^{-0,245} \quad (R^2 = 0,996),$$

согласно которой к 10 миллионам импульсов выход коротковолнового УФ-излучения лампы в данном режиме энергопитания может составить ~ 30 % от начального.

В [26] показано, что скорость деградации оптических характеристик лампы в существенной степени зависит от способа инициирования разряда в лампе. Действительно, при подаче высоковольтного импульса поджига при традиционных способах инициирования (по схемам последовательного или параллельного поджига) искровой пробой межэлектродного промежутка происходит по внутренней поверхности кварцевой колбы (поверхность всегда снижает пробойную напряженность поля). Далее в образованный ионизированный канал вкладывается электрическая энергия, запасенная в конденсаторе, происходит нагрев и расширение плазмы, при этом плазменный канал все время непосредственно контактирует с кварцевой стенкой, оказывая на нее мощное тепловое и радиационное (через вакуумный ультрафиолет) воздействие. В результате протекающих термофизических и плазмохимических процессов происходит ускоренная деградация оптических свойств кварцевой стенки. Интенсивность этих процессов можно значительно снизить, если осуществить пробой межэлектродного промежутка по оси лампы и обеспечить осесимметричное расширение плазменного канала. Такой режим реализуется при организации в лампе дежурной дуги, создающей на оси лампы непрерывно существующий ионизированный канал, на который периодически разряжается основная

конденсаторная батарея. При таком способе инициирования усложняется схема питания лампы (в разрядный контур необходимо вводить сильноточные высоковольтные ключи, требуется дополнительный источник питания дуги и др.) и снижается в целом эффективность конверсии первичной электрической энергии в излучение. Однако, как экспериментально показано в [26], скорость деградации оптических характеристик лампы в коротковолновой УФ-области спектра уменьшается в несколько раз – для лампы с внутренним диаметром 5 мм при осесимметричном развитии разряда из слаботочного вспомогательного плазменного канала снижение энергии излучения в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda = 200\text{--}300$  нм через 1 миллион импульсов составляло примерно 10 %.

Отметим, что обсуждаемые выше рекомендации по выбору оптимальных режимных параметров ИКЛ для актуальных медико-биологических и экологических применений сохраняются при любых способах инициирования разряда в лампах.

## Заключение

В настоящее время плазменно-оптические технологии, основанные на использовании ИКЛ, получают все большее распространение для решения актуальных экологических и медико-биологических задач. Это связано с рядом как физических, так и технологических и эксплуатационных особенностей таких источников излучения. К физическим особенностям относятся высокая интенсивность и широкий спектр оптического воздействия, к технологическим – возможность широкодиапазонного (в пределах нескольких порядков) варьирования средней мощностью излучения при сохранении спектральных характеристик лампы, практически безынерционность включения и др., к эксплуатационным – независимость физических характеристик ламп от параметров окружающей среды и экологическая чистота (отсутствие ртути и других токсичных конструкционных материалов).

Однако одним из проблемных аспектов широкого применения ИКЛ является сравнительно небольшой ресурс их работы, что, в первую очередь, связано с чрезвычайно высокой энергонапряженностью основных кон-

структивных элементов лампы – электродной системы и колбы. Долговечность ИКЛ в значительной степени определяется технологическим уровнем лампового производства и качеством применяемых конструкционных материалов, однако не менее важным являются также способ инициирования разряда и режимные параметры эксплуатации лампы. Режимные параметры ИКЛ в общем случае должны задаваться исходя из требований решаемых задач, однако часто удовлетворение в полной мере этим требованиям приводит к катастрофическому снижению ресурса лампы. Поэтому научно и технически обоснованный компромиссный выбор режимных параметров ИКЛ применительно к конкретной решаемой задаче является весьма актуальным.

В данной работе предложен подход к определению компромиссных режимных параметров трубчатых ИКЛ, обеспечивающих приемлемые для новых медико-биологических и экологических технологий спектрально-энергетические и ресурсные характеристики ламп. Разработанный подход базируется на фундаментальных представлениях о физике сильноточных импульсных разрядов в газах и результатах экспериментальных и достаточно хорошо апробированных теоретических исследований ИКЛ. Исходными данными являются конструктивные параметры лампы: внутренний диаметр колбы лампы, длина межэлектродного промежутка и холодное давление рабочего газа (ксенона); результатом – диапазоны оптимальных параметров электротехнического контура: емкости конденсаторной батареи, зарядного напряжения и характерного времени выделения энергии (или индуктивности контура), обеспечивающие приемлемый компромисс между спектральными характеристиками излучения в коротковолновой УФ-области спектра ( $\Delta\lambda = 200\text{--}300$  нм) и ресурсом лампы.

На примере стандартной ИКЛ типа ИМП-7/120 экспериментально исследованы основные электротехнические, спектрально-энергетические и ресурсные характеристики лампы, работающей в режиме, параметры которого соответствовали разработанным рекомендациям. Показано, что оптимальные режимные параметры с приемлемой точностью определяются конструктивными параметрами

лампы и поверхностной плотностью электрической мощности разряда, рекомендуемые значения которой для вышеуказанных применений составляют  $P_s = 60 \pm 15$  кВт/см<sup>2</sup>. При  $P_s \approx 75$  кВт/см<sup>2</sup> яркостные температуры лампы в коротковолновой УФ-области спектра достигают 8550–8700 К при энергетическом выходе излучения в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda = 200\text{--}300$  нм  $\eta_{200\text{--}300} \approx 6,5$  %.

Проведенные ресурсные испытания лампы ИМП-7/120 в схеме с последовательным инициированием разряда показали, что наиболее существенное снижение потока биоцидного УФ-излучения происходит в течение первых 300 тысяч импульсов (падение интенсивности до ~ 60 % от исходного уровня); в дальнейшем скорость деградации существенно снижается и при обработке 1 миллиона разрядных импульсов составляет ~ 1,3 % на 100 тысяч разрядных импульсов при общем снижении потока УФ-излучения до ~ 50 %. Скорость деградации оптических характеристик лампы может быть уменьшена за счет использования схемы питания лампы с дежурной дугой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шестопалов Н. В., Акимкин В. Г., Федорова Л. С., Скопин А. Ю., Гольдштейн Я. А., Голубцов А. А., Куреев С. Г., Поликарпов Н. А., Шапковский С. Г. / Медицинский алфавит. Эпидемиология и гигиена. 2017. Т. 2. № 18. С. 5.
2. Nerandzic M. M., Thota P., Sankar C. T., Jencson A., Cadnum J. L., Ray A. J., Salata R. A., Watkins R. R., Donskey C. J. / Infection control and hospital epidemiology/ 2015. Vol. 36 (2). P. 192. <https://doi.org/10.1017/ice.2014.36>.
3. Jean J., Rodriguez-López M. I., Jubinville E., Núñez-Delgado E., Gómez-López V. M. / Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 2021. Vol. 215. P. 112106. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2020.112106>.
4. Bagrov V. V., Bukhtiyarov I. V., Volodin L. Y., Kamrukov A. S., Kondratiev A. V. / Biomedical Engineering. 2023. Vol. 57. № 2. P. 77–80. <https://doi.org/10.1007/s10527-023-10272-0>.
5. Абдувосидов Х. А., Снигоренко А. С., Чекмарева И. А., Паклина О. В., Семенов С. В., Макеева Е. А. / Хирург. 2015. № 2. С. 15.
6. Dunn J., Ott T., Clark W. / Food Technol. 1995. Vol. 49. № 9. P. 95.
7. Gómez-López V. M., Ragaert P., Debevere J., Devlieghere F. / Trends Food Science and Technology. 2007. Vol. 18. P. 464.
8. Bagrov V. V., Volodin L. Yu., Dolgikh V. V., Kamrukov A. S., Kondratiev A. V., Landysheva A. Y.,

- Polevoy D. E., Fedorov A. D.* / Food Packaging and Shelf Life. 2024. 41.101229.  
<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101229>.
9. *Архинов В. П., Камруков А. С., Козлов Н. П., Корон Е. Д., Шаиковский С. Г., Яловик М. С.* / Конверсия. 1996. № 6. С. 46.
10. *Garvey M., Hayes J., Clifford E., Rowan N.* / Water and Environment Journal. 2015. Vol. 29. P. 27.
11. *Fortunato L., Yarali E., Sanchez-Huerta C., Anthopoulos T. D.* / Journal of Water Process Engineering. 2021. Vol. 44. P. 102414.
12. *Камруков А. С., Козлов Н. П., Селиверстов А. Ф., Шаиковский С. Г., Яловик М. С.* / Безопасность в техносфере. 2006. № 1. С. 38.
13. *Камруков А. С., Козлов Н. П., Селиверстов А. Ф., Шаиковский С. Г., Яловик М. С.* / Безопасность в техносфере. 2006. № 2. С. 21.
14. *Камруков А. С., Козлов Н. П., Селиверстов А. Ф., Шаиковский С. Г., Яловик М. С.* / Безопасность в техносфере. 2006. № 3. С. 17.
15. *Wekhof A.* / PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology. 2000. Vol. 54. P. 264.
16. *Камруков А. С., Козлов Н. П., Шаиковский С. Г., Яловик М. С.* / Безопасность жизнедеятельности. 2003. № 1. С. 32.
17. *Dishington R. H., Hook W. R., Hilberg R. P.* / Applied Optics. 1974. Vol. 13. № 10. P. 2300.
18. *Маршак И. С.* Импульсные источники света. – М.: Энергия, 1978.
19. *Камруков А. С., Кулебякина А. И.* Импульсные ксенонные лампы. Техника, эксперимент, расчет – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.
20. *Розанов А. Г.* Обзоры по электронной технике. Сер. IV. Вып. 3(636). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1979.
21. *Smith B.* Overview of Flashlamps and arc lamps / Proceed. of SPIE. 1986. Vol. 609. P. 5.
22. *Андреев С. И., Ивасенко Н. Ф.* Основы расчета импульсных ксенонных ламп. – Томск: Изд-во Томского университета, 1982.
23. *Markiewicz J. P., Emmett J. L.* / Journal of Quantum Electronics. 1966. Vol. 2. № 11. P. 707.  
 doi: 10.1109/JQE.1966.1073757.
24. *Goncz J. H.* / Journal of Applied Physics. 1965. Vol. 36. P. 742.
25. *Архинов В. П., Желазев И. А., Ивашкин А. Б., Камруков А. С., Семенов К. А.* / Приборы и техника эксперимента. 2017. № 5. С. 159.
26. *Киреев С. Г., Гавриш С. В., Шаиковский С. Г.* / Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 1. С. 90.

PACS: 52.80.-s

## Selection of optimal operating parameters of pulsed xenon lamps for biomedical and environmental applications

*L. Y. Volodin, A. S. Kamrukov and A. V. Kondratiev*

Bauman Moscow State Technical University  
 Bd. 1, 5 2nd Baumanskaya st., Moscow 105005, Russia  
 E-mail: kamrukov@mail.ru

*Received 3.03.2024; revised 14.03.2024; accepted 19.03.2024*

***An approach is proposed to determine the optimal operating parameters of tubular pulsed xenon lamps, providing spectral, energy and resource characteristics of lamps acceptable for current biomedical and environmental applications. The approach is based on fundamental ideas about the physics of high-current pulsed discharges in gases and the results of experimental and well-tested theoretical studies of pulsed xenon lamps. It is shown that the optimal operating parameters are determined by the design parameters of the lamp and the surface density of the electric power of the discharge, the recommended values of which for the above applications are  $60 \pm 15$  kW/cm<sup>2</sup>. The results of experimental studies of the main electrical, spectral, energy and resource characteristics of a standard pulsed xenon lamp in the mode corresponding to the developed recommendations are presented.***

***Keywords:*** pulsed xenon lamp, optimal operating parameters, spectral characteristics, brightness temperature, service life.

## REFERENCES

1. Shestopalov N. V., Akimkin V. G., Fedorova L. S., Skopin A. Yu., Goldstein Ya. A., Golubtsov A. A., Kireev S. G., Polikarpov N. A. and Shashkovsky S. G., Medical alphabet. Epidemiology and hygiene **2** (18), 5 (2017).
2. Nerandzic M. M., Thota P., Sankar C. T., Jencson A., Cadnum J. L., Ray A. J., Salata R. A., Watkins R. R. and Donskey C. J., Infection control and hospital epidemiology **36** (2), 192 (2015).  
<https://doi.org/10.1017/ice.2014.36>.
3. Jean J., Rodríguez-López M. I., Jubinville E., Núñez-Delgado E. and Gómez-López V. M., Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology **215**, 112106 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2020.112106>
4. Bagrov V. V., Bukhtiyarov I. V., Volodin L. Y., Kamrukov A. S. and Kondratiev A. V., Biomedical Engineering. **57** (2), 77–80 (2023).  
<https://doi.org/10.1007/s10527-023-10272-0>
5. Abduvosidov H. A., Snigorenko A. S., Chekmareva I. A. Paklina O. V., Semenov S. V. and Makeeva E. A., Surgeon, № 2, 15 (2015).
6. Dunn J., Ott T. and Clark W., Food Technol. **49** (9), 95 (1995).
7. Gómez-López V. M., Ragaert P., Debevere J. and Devlieghere F. / Trends Food Science and Technology **18**, 464 (2007).
8. Bagrov V. V., Volodin L. Yu., Dolgikh V. V., Kamrukov A. S., Kondratiev A. V., Landysheva A. Y., Polevoy D. E. and Fedorov A. D., Food Packaging and Shelf Life. **41**, 101229 (2024).  
<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101229>
9. Arkhipov V. P., Kamrukov A. S., Kozlov N. P., Korop E. D., Shashkovsky S. G. and Yalovik M. S., Conversion, № 6, 46 (1996).
10. Garvey M., Hayes J., Clifford E. and Rowan N., Water and Environment Journal **29**, 27 (2015).
11. Fortunato L., Yarali E., Sanchez-Huerta C. and Anthopoulos T. D., Journal of Water Process Engineering **44**, 102414 (2021).
12. Kamrukov A. S., Kozlov N. P., Seliverstov A. F., Shashkovsky S. G. and Yalovik M. S., Safety in the technosphere", № 1, 38 (2006).
13. Kamrukov A. S., Kozlov N. P., Seliverstov A. F., Shashkovsky S. G. and Yalovik M. S., Safety in the technosphere", № 2, 21 (2006).
14. Kamrukov A. S., Kozlov N. P., Seliverstov A. F., Shashkovsky S. G. and Yalovik M. S., Safety in the technosphere", № 3, 17 (2006).
15. Wekhof A., PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology **54**, 264 (2000).
16. Kamrukov A. S., Kozlov N. P., Shashkovsky S. G. and Yalovik M. S., Life safety, № 1, 32 (2003).
17. Dishington R. H., Hook W. R. and Hilberg R. P., Applied Optics **13** (10), 2300 (1974).
18. Marshak I. S., Pulsed light sources, Moscow, Energiya, 1978.
19. Kamrukov A. S. and Kulebyakina A. I., Pulsed xenon lamps. Technique, experiment, calculation. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2011.
20. Rozanov A. G., Reviews on electronic technology. Series IV. Issue 3(636), Moscow, Central Research Institute "Electronics".
21. Smith B., Overview of Flashlamps and arc lamps, Proceed. Of SPIE **609**, 5 (1986).
22. Andreev S. I. and Ivasenko N. F., Tomsk, Publishing house of Tomsk University, 1982.
23. Markiewicz J. P. and Emmett J. L., Journal of Quantum Electronics **2** (11), 707 (1966).  
doi: 10.1109/JQE.1966.1073757
24. Goncz J. H., Journal of Applied Physics **36**, 742 (1965).
25. Arkhipov V. P., Zhelaev I. A., Ivashkin A. B., Kamrukov A. S. and Semenov K. A., Instruments and experimental technique, № 5, 159 (2017).
26. Kireev S. G., Gavrish S. V. and Shashkovsky S. G., Successes of applied physics **10** (1), 90 (2022).