

Алгоритм расчета характеристик импульсного газоразрядного источника УФ-излучения для проточных систем биоочистки

С. Г. Киреев, А. И. Кулебякина, С. Г. Шашковский, К. А. Тумашевич

Предложен алгоритм расчета параметров импульсной газоразрядной лампы и электрических характеристик разрядного контура для решения задач фотоиндуцированного воздействия на среду в проточной системе. На примере модели реактора идеального вытеснения для решения фотобиологической задачи выполнен расчет параметров импульсной газоразрядной лампы, расположенной поперек направления движения среды. Показано, что при определенной частоте следования вспышек, зависящей от размеров реактора и расхода системы, равномерность сообщенной дозы в продольном сечении реактора с импульсной лампой приближается к равномерности поля доз в реакторе с лампой постоянного горения. Решение приведенной системы уравнений позволило рассчитать параметры межэлектродного промежутка лампы, емкость и индуктивность разрядного контура.

Ключевые слова: импульсная лампа, проточная система, излучение, частота следования импульсов, яркостная температура, разрядный контур.

Ссылка: Киреев С. Г., Кулебякина А. И., Шашковский С. Г., Тумашевич К. А. // Прикладная физика. 2019. № 5. С. 71.

Reference: S. G. Kireev, A. I. Kulebyakina, S. G. Shashkovskiy, and K. A. Tumashevich, Prikl. Fiz., No. 5, 71 (2019).

Введение

Излучение газового разряда постоянно расширяет сферы своего применения. Одним из современных направлений является использование источников УФ-излучения в проточных системах для очистки различных сред как от широкого спектра микроорганизмов (вирусы, бактерии, грибы), так и от летучих и раство-

ренных органических соединений напрямую или посредством индуцирования интенсивных окислительных технологий (АОР – advanced oxidation processes) [1]. В настоящее время для решения указанных задач, преимущественно, используются низкоинтенсивные ртутные лампы низкого и среднего давлений [2, 3].

Успешное применение импульсных газоразрядных ламп (ИГЛ) в медицине [4, 5] и фотохимических технологиях [6] обусловлено благодаря их особенностям: сплошной спектр излучения; высокие интенсивность излучения и удельные характеристики; компактность лампы. Это позволяет рассматривать их в качестве перспективной разработки для технологии обработки проточных сред. Оптимизация системы, представляющей комбинацию из трех элементов: источник электрического питания, габариты разрядного промежутка ИГЛ, направление потока среды (вдоль или поперек) относительно лампы, – требует решения на этапе проектирования устройства. Экспе-

Киреев Сергей Геннадьевич, нач. лаб.
Кулебякина Анна Игоревна, зав. сектором.
Шашковский Сергей Геннадьевич, гл. конструктор, к.т.н.
Тумашевич Константин Александрович, инженер-исследователь.
ООО «НПП «Мелитта».
Россия, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 16/10.
Тел. +7(495) 729-35-34. E-mail:
kireevsg.melitta@gmail.com

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2019 г.

© Киреев С. Г., Кулебякина А. И., Шашковский С. Г., Тумашевич К. А., 2019

риментальный поиск наиболее эффективной системы, обеспечивающей равномерность со-общенной потоку среды дозы, является трудо-емким и многофакторным процессом. Для сужения области оптимизации используют метод математического моделирования.

Авторы [7] представили модель расчета гидродинамических процессов на основе численного моделирования с дискретизацией по времени мгновенной дозы облучения, сообщаемой ИГЛ. Однако методика расчета параметров источника излучения и электротехнического контура авторами представлена не была, а предложенный способ оценки эффективности фотоиндуцированных процессов, основанный на расчете количества облученных частиц, получивших превышение над минимальной дозой, дает завышенные значения.

Данная работа посвящена рассмотрению алгоритма расчета параметров импульсных газоразрядных источников излучения и электротехнических параметров контура применительно к проточным системам.

Блок-схема реактора

Ввиду значительных габаритных размеров ртутных ламп низкого давления (РЛНД), в конструкции современных реакторов для обработки сред в проточных системах используется только продольное расположение ламп относительно направления движения потока [2], т. е. ось лампы совпадает с направлением скорости потока среды. Такая конструкция реактора приемлема только для оптически плотных сред, эффективно поглощающих излучение УФ-источника. В оптически прозрачной среде световой путь будет ограничен габаритами реактора, что не обеспечит должной эффективности работы системы. Импульсные лампы обладают компактностью, что позволяет их располагать поперек направления потока и эффективно облучать независимо от оптической плотности среды.

На рис. 1 представлена упрощенная конструкция реактора проточной системы с ИГЛ, расположенной поперек движения потока.

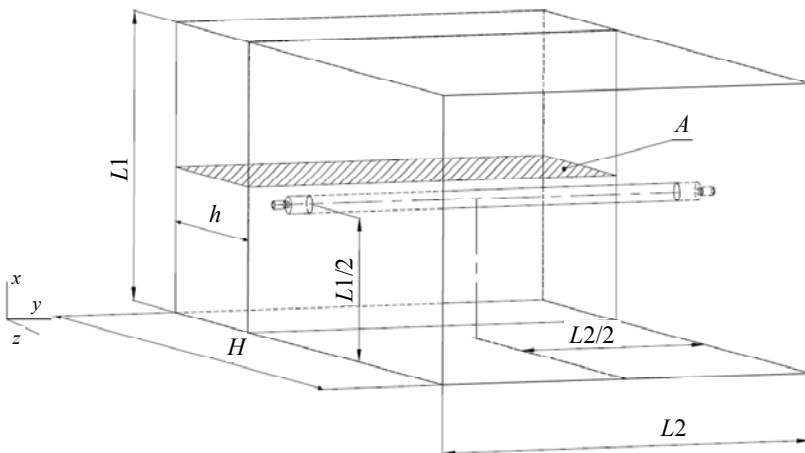


Рис. 1. Общий вид реактора проточной системы с указанием поршня. Раскрытие обозначений дано далее в тексте.

Расчет частоты следования импульсов источника УФ-излучения

Частота следования импульсов — легко варьируемый параметр ИГЛ. Предельная частота трубчатых ламп определяется удельной электрической нагрузкой и скоростью восстановления электрической пробивной прочности канала [8]. Использование высокоскоростного коммутатора позволяет увеличить

рабочую частоту ИГЛ за счет управляемой подачи напряжения на электроды лампы.

В приближении реактора идеального вытеснения в зависимости от частоты вспышек и скорости потока среды весь внутренний объем приведенного на рис.1 реактора можно разбить на облучаемые за единичный импульс излучения объемы (поршни) длиной h :

$$h = \frac{v}{f} = \frac{P}{S_c} \times \frac{1}{f} \quad (1)$$

где v – скорость потока среды; f – частота следования импульсов излучения ИГЛ; P – объемный расход потока среды в системе; S_c – площадь поперечного сечения реактора.

Смоделировав поле облученности, запишем уравнение для определения энергетической экспозиции всех точек поршня, движущегося вдоль координаты z , на выходе из реактора:

$$E(x, y, z, \lambda) = \sum_{i=0}^N \left(E_m(x, y, z + ih, \lambda) \times k \left(x, y, \frac{H}{2} - ih, \lambda \right) \right) \quad (2)$$

где $E(x, y, z, \lambda)$ – спектральная энергетическая экспозиция за время пребывания единичного поршня в реакторе; $E_m(x, y, z, \lambda)$ – спектральная энергетическая экспозиция, полученная единичным элементом среды с координатами x, y, z за один импульс излучения; i – момент облучения единичного поршня в реакторе; N – момент последнего облучения поршня, вычисляемый по отношению длины реактора H в направлении движения среды к ширине поршня h ; $k(x, y, z)$ – коэффициент поглощения среды.

Координата $z + ih$ в выражении (2) определяет смещение поршня на его длину h между моментами мгновенного облучения. Координаты x, y остаются постоянными в приближении реактора идеального вытеснения.

Представив ИГЛ как цилиндрический источник излучения конечной длины, запишем аналитическое выражение для расчета поля облученности [9]:

$$E_m(x, y, z, \lambda) = 2 \frac{B}{\pi} \arcsin \left(\frac{r}{\sqrt{y^2 + z^2}} \right) \times \left(\frac{x/\sqrt{y^2 + z^2}}{\sqrt{\left(x/\sqrt{y^2 + z^2}\right)^2 + 1}} + \frac{l - x/\sqrt{y^2 + z^2}}{\sqrt{\left(l - x/\sqrt{y^2 + z^2}\right)^2 + 1}} \right) \quad (3)$$

где B – излучательная способность единицы поверхности лампы, Дж/см²; r – внутренний радиус лампы, см; l – межэлектродное расстояние лампы, см.

В качестве примера оценим распределение энергетической экспозиции по продольному сечению поршня на уровне полувысоты реактора (сечение A на рис. 1), набранное им за время пребывания в реакторе с поперечным сечением 20×20 см, длиной 100 см и производительностью 1 м³/час. За счет прохождения сечения A через ИГЛ неравномерность набранной дозы по длине поршня в нем будет максимальной по сравнению с остальными возможными сечениями. ИГЛ с размерами межэлектродного промежутка 3/80 мм и частотой следования вспышек 0,5 Гц, причем ИГЛ располагается перпендикулярно движению потока среды. На рис. 2 дано распределение энергетической экспозиции D по длине поршня h в сечении A . В таких условиях набранная элементарными площадками энергетическая экспозиция по длине поршня может отличаться в 10 раз (рис. 2, а), что объясняется нахождением определенных точек среды в момент импульса излучения в непосредственной близости к ИГЛ.

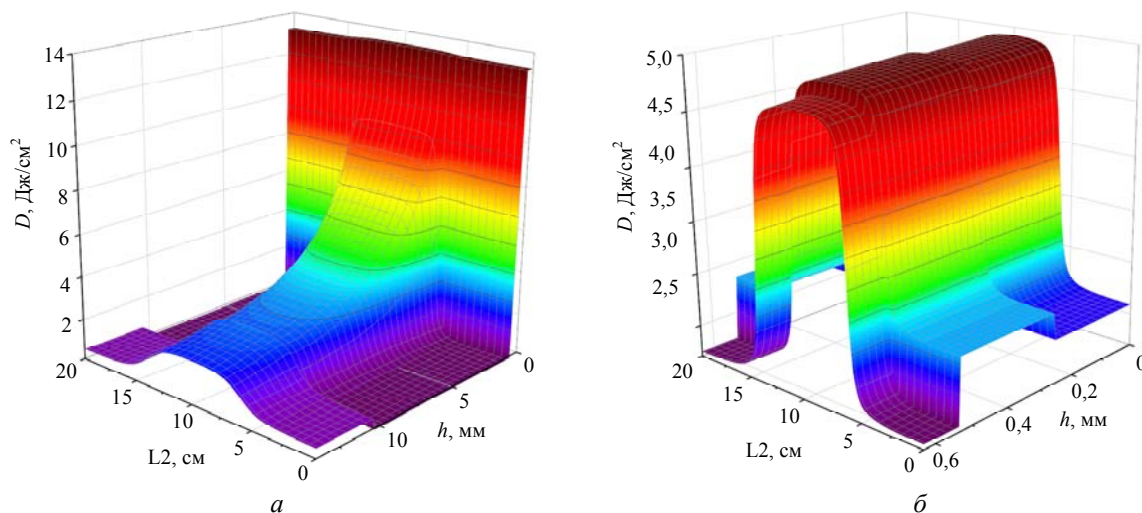


Рис. 2. Распределение энергетической экспозиции D по длине поршня h в сечении A при оптической плотности среды 2,3 при частоте следования вспышек 0,5 Гц (а) и 11 Гц (б).

Решая задачу оптимизации методом градиентного спуска, зафиксировав среднюю мощность излучения и задав показатель равномерности, как отношение минимальной энергетической экспозиции к максимальной вдоль длины поршня, можно подобрать частоту следования вспышек импульсной лампы (см. рис. 2, б), обеспечивающую удовлетворяющую заданным условиям равномерность распределения набранной дозы по продольному сечению поршня.

Стоит отметить, что при определенном показателе равномерности удастся получить характер распределения дозы, неотличимый от создаваемого источником излучения постоянного горения.

Полученный результат позволяет выполнить расчет энергии излучения единичной вспышки, являющейся функцией фотобиологического или фотохимического эффектов. С учетом экспоненциального характера фотохимического [10] и фотобиологического [11] воздействий на облучаемую среду, уравнение, характеризующее эффективность, имеет вид:

$$S(x, y, z) = e^{-k_r \times E(x, y, z)} \quad (4)$$

где $S(x, y, z)$ – отношение количества вещества после облучения к исходному количеству вещества; k_r – константа скорости реакций; $E(x, y, z)$ – энергетическая экспозиция в спектральном диапазоне поглощения (чувствительности) среды.

Для расчета фотоиндуцированного эффекта в поршне необходимо проинтегрировать уравнение по всем трем координатам. Для этого целесообразно воспользоваться методом численного интегрирования Симпсона за счет приближения подынтегральной функции в выбранном диапазоне (a, b) интерполяционным многочленом второй степени:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{6} \times \left(f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right). \quad (5)$$

Решение уравнения с использованием формулы для всех трех координат позволяет выполнить расчет эффективности воздействия излучения на среду поршня:

$$Ef = (1 - S) \times 100 \% \quad (6)$$

где Ef – эффективность фотобиологического или фотохимического воздействия излучения на среду; S – интегральное по объему поршня отношение количества вещества после облучения к исходному количеству вещества.

Таким образом, задав требуемую эффективность радиационного воздействия, представляется возможность решения оптимизационной задачи относительно минимально возможной энергии излучения единичного импульса для удовлетворения поставленных условий. Так, для задачи обеззараживания среды с учетом рассчитанной выше частоты следования вспышек 11 Гц, требуемой эффективности обеззараживания 90 % и константы чувствительности микроорганизма $46 \text{ см}^2/\text{Дж}$ минимальная энергия излучения, удовлетворяющая всем условиям составляет 5,3 Дж.

Расчет яркостной температуры

Определяющим параметром ИГЛ, с точки зрения излучательной способности, является яркостная температура плазменного канала, отвечающая за спектральное распределение источника излучения. Варьируя параметры разрядного контура, можно изменять яркостную температуру ИГЛ в достаточно широких пределах вплоть до значений режима насыщения световой яркости [12] (~30 кК).

С одной стороны, яркость лампы можно изменять в зависимости от решаемой прикладной задачи. Так, например, для решения задач обеззараживания среды напрашивается подбор яркостной температуры таким образом, чтобы максимум спектра излучения приходился на максимум чувствительности микроорганизмов (260–275 нм [11]). Такой подход при оценке яркости плазменного образования в приближении абсолютно черного тела (АЧТ) приводит к значению ~11 кК.

Однако решая оптимизационную задачу поиска максимального выхода излучения в бактерицидном спектральном диапазоне (200–300 нм [11]) с учетом спектрального коэффициента пропускания кварцевой оболочки импульсной лампы, получаем рост излучательных способностей с увеличением яркостной температуры.

Наиболее изученными и освоенными в промышленности являются трубчатые ИГЛ, обладающие высокой энергетической эффективностью (~90 %) и светоотдачей (до 80 %) [8]. Повышение температуры плазмы ограничено средней электрической мощностью, отнесенной к площади наружной стенки ≈ 14 Вт/см². Кроме того, рост тепловых потоков на оболочку лампы за счет увеличения энергии в импульсе вызывает обратимую непрозрачность кварца [13], интенсификацию плазменно-химических процессов на внутренней поверхности стенки, наработку кислорода за счет эрозии кварцевой стенки, приводящего к окислению материала электродов и изменению состава плазмообразующей среды ИГЛ [14]. Указанные процессы приводят к резкому снижению ресурсных характеристик трубчатой ИГЛ. Поддержание яркостной температуры в пределах 7000–8500 К позволяет достаточно эффективно преобразовывать электрическую энергию в УФ-излучение и одновременно исключить возможность превышения предельных тепловых нагрузок на кварцевую стенку оболочки.

Таким образом, теоретическое увеличение яркостной температуры ограничено конструктивными особенностями газоразрядных импульсных ламп.

Расчет параметров контура и межэлектродного промежутка

С учетом известной эффективности преобразования запасаемой в накопителе энергии в излучательную можно записать

$$W = W_{\text{изл}} / \eta \quad (7)$$

где W – запасаемая в накопителе энергия; $W_{\text{изл}}$ – энергия излучения, найденная ранее; η – излучательный КПД в спектральном диапазоне энергии излучения $W_{\text{изл}}$.

Записав аппроксимационное уравнений для определения яркостной температуры [15]:

$$T_{bb} = 570 \times \left(\frac{W \times k_c}{\pi \times d \times l \times \tau} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

выразим из него межэлектродное расстояние l , и дополнив уравнениями для расчета электри-

ческих параметров контура [15], получаем расчетную систему формул:

$$\begin{aligned} l(L, C) &= \left(\frac{570}{T_{bb}} \right)^4 \times \frac{W \times k_c}{\pi d \times \tau(L, C)} \\ \tau(L, C) &= \sqrt{L \times C / 0,3} \\ K_0(L, C) &= 1,27 \left(\frac{l(L, C)}{d} \right) \times (P_0 / 450)^{0,2} \\ Z_0(L, C) &= \sqrt{L / C} \\ \gamma &= R_{\Sigma}(L, C) / 2Z_0(L, C) \\ R_{\Sigma}(L, C) &\approx 0,3Z_0 + 1,28 \times K_0(L, C)^2 / U_0(C) \\ U_0(C) &= \sqrt{2W / C}. \end{aligned} \quad (9)$$

В приведенной системе уравнений необходимо принять несколько допущений. Параметр затухания контура γ приравняется значению 0,8 для получения наиболее эффективного энерговыклада в плазменную нагрузку. При расчете суммарного сопротивления контура с лампой R_{Σ} сопротивление контура, ввиду его малости, не учитывается. Давление p_0 холодного газа считается известной величиной и подставляется в уравнение конструктивного параметра K_0 в торрах. Уравнения, определяющие характерное время энерговыклада τ , волновое сопротивление Z_0 и зарядное напряжение U_0 , подставляются в уравнения для нахождения параметра затухания γ , межэлектродного промежутка l и суммарного сопротивления R_{Σ} . Сформированные уравнения решаются совместно для определения длины межэлектродного промежутка, индуктивности контура L , и емкости разрядного конденсатора C .

Проведем расчет для яркостной температуры 8 кК, внутреннего диаметра лампы 0,5 см, давления холодного газа 220 Торр, запасаемой в конденсаторе энергии 53 Дж, рассчитанной по уравнению с учетом полученной ранее энергии излучения 5,3 Дж и излучательного КПД = 0,1 в спектральном диапазоне 200–300 нм. Принимаем далее коэффициент энерговыклада k_c равным 0,95, индуктивность контура большей 5 мкГн, а емкость разрядного конденсатора, лежащей в диапазоне 10–100 мкФ. В этих условиях решение системы уравнений даст при фиксированной индук-

тивности ряд соответствующих друг другу значений емкости и межэлектродного расстояния, что отражено на рис. 3.

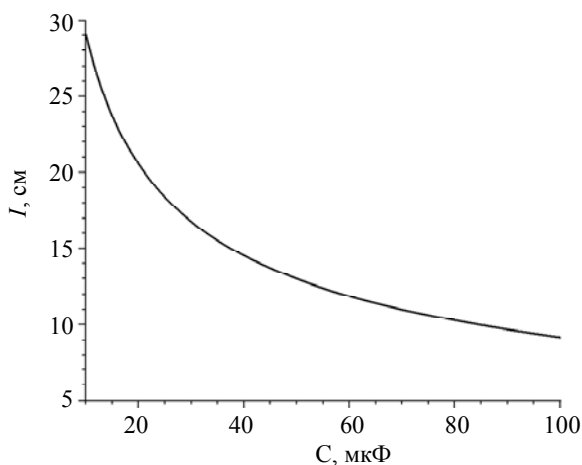


Рис. 3. Расчетная зависимость межэлектродного расстояния l импульсной газоразрядной лампы от емкости конденсатора C при индуктивности $20,8$ мкГн.

Расчитанные параметры разрядного промежутка ИГЛ и электрические характеристики ее контура получены на основе модели реактора идеального вытеснения и являются оценочными. Более точные значения можно получить при помощи численного моделирования гидродинамических и излучательных процессов, что позволит получить временную зависимость параметров координат среды, а далее провести расчет, аналогичный вышепредложенному.

Выбранная схема реактора с одной лампой применена исключительно для упрощения алгоритма и может быть доработана еще одним оптимизационным параметром, а именно, количеством ИГЛ.

Заключение

В работе представлен алгоритм расчета параметров импульсной газоразрядной лампы на основе габаритов проточной системы и ее производительности. При помощи метода линейной оптимизации решается задача расчета минимальной частоты следования импульсов, обеспечивающей равномерное распределение

дозы в продольном сечении реактора, и определения энергии излучения, требуемой для решения задачи фотоиндуцированного воздействия на среду. Последующее решение системы уравнений, описывающих параметры электрического контура, позволяет однозначно определить электротехнические и конструктивные характеристики импульсной газоразрядной лампы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Parsons S. Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. – London: IWA Publishing, 2004.
2. Кармазинов Ф. В., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Храменков С. В. Ультрафиолетовые технологии в современном мире. – Долгопрудный: ИД Интеллект, 2012.
3. Wang D., Bolton J. R., Hofmann R. // Water Res. 2012. Vol. 46. P. 4677.
4. Sampathkumar P., Folkert C., Barth J. E., Nation L., Benz M., Hesse A., Mielke C. L., Zaveleta K. W. // AJS. 2019. Vol. 47. P. 406.
5. Шестопалов Н. В., Акимкин В. Г., Федорова Л. С., Скопин А. Ю., Гольдштейн Я. А., Голубцов А. А., Киреев С. Г., Поликарпов Н. А., Шапковский С. Г. // МедАлфавит. 2017. Т. 2. № 18. С. 5.
6. Blystone P. G., Johnson M. D., Haag W. R., Daley P. F. / Emerging Technologies in Hazardous Waste Management III (Washington. 1993). P. 380.
7. Ивашкин А. Б., Камруков А. С., Новиков Д. О., Малков К. И. // БвТ. 2016. Т. 5. № 4. С. 51.
8. Маршак И. С. Импульсные источники света. – М.: Энергия, 1978.
9. Григорьев Б. А. Импульсный нагрев излучением. – М.: Наука, 1974.
10. Crittenden J. C., David S. H., Hand W., Green S. A. // Water Res. 1999. Vol. 33. No. 10. P. 2315.
11. Kowalski W. Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook. UVGI for Air and Surface Disinfection. – NY: Springer, 2009.
12. Камруков А. С., Киреев С. Г., Козлов Н. П., Шапковский С. Г. // ЖПС. 2017. Т. 84. № 3. С. 408.
13. Belov S. N., Demidov M. I., Ogurtsova N. N., Podmoshenskii I. V., Rogovtsev P. N., Shelemina V. M. // ZPS. 1969. Vol. 10. No. 3. P. 408.
14. Симакин А. Г. Оптимизация и создание газоразрядных приборов оптического излучения повышенной надежности для применения в электронных устройствах: дис. канд. тех. наук. Владикавказ. 2010.
15. Камруков А. С., Кулебякина А. И. Инженерные методы расчета импульсных ксеноновых ламп. – М.: ООО НИЦ «Инженер», 2010.

Calculation algorithm for the characteristics of a pulsed discharge radiation source for flow-through systems

S. G. Kireev, A. I. Kulebyakina, S. G. Shashkovskiy, and K. A. Tumashevich

Scientific and Industrial Enterprise "Melitta", Ltd
16/10 Mikluho-Maklaya st., Moscow, 117977, Russia
E-mail: kireevsg.melitta@gmail.com

Received September 10, 2019

Calculation algorithm for the characteristics of a flash lamp and the discharge circuit to solve problems of light induced exposure to the medium in a flow-through system is proposed. Using the plug flow reactor model for photoinactivation of microorganisms, the parameters of a flash lamp located across the direction of a medium motion were calculated. It was shown that at a certain flash rate, depending on the size of the reactor and the flow rate of the system, the uniformity of the dose field in the longitudinal section of the reactor with a flash lamp approaches the uniformity of the dose field in the reactor with a continuous light lamp. The solution of a received system of equations made it possible to calculate the parameters of the arc length of the lamp, the capacitance and inductance of the discharge circuit

Keywords: flash lamp, flow-through system, radiation, flashing rate, brightness temperature, discharge circuit.

REFERENCES

1. S. Parsons, *Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment* (IWA Publishing, London, 2004).
2. F. V. Karamzinov, S. V. Kostuchenko, N. N. Kudriavtsev, and S. V. Hramenkov, *UV technologies in the modern world* (Intellect, Dolgoprudny, 2012) [in Russian].
3. D. Wang, J. R. Bolton, and R. Hofmann, *Water Res.* **46**, 4677 (2012).
4. P. Sampathkumar, C. Folkert, J. E. Barth, L. Nation, M. Benz, A. Hesse, C. L. Mielke, and K. W. Zaveleta, *AJIC* **47**, 406 (2019).
5. N. V. Shestopalov, V. G. Akimkin, L. S. Federova, A. U. Skopin, Ya. A. Goldshteyn, A. A. Golubtsov, S. G. Kireev, N. A. Polikarpov, and S. G. Shashkovskiy, *MedAlphabet* **2** (18), 5 (2017)
6. P. G. Blystone, M. D. Johnson, W. R. Haag, and P. F. Daley, in *Emerging Technologies in Hazardous Waste Management III* (Washington, 1993). P. 380.
7. A. B. Ivashkin, A. S. Kamrukov, D. O. Novikov, and D. I. Malkov, *BvT.* **5** (4), 51 (2016).
8. I. S. Marshak, *Pulsed Light Sources* (Springer US, New York, 1984; Energia, Moscow, 1978).
9. B. A. Grigoriev, *Heating by the Pulsed Radiation*. (Nauka, Moscow, 1974) [in Russian].
10. J. C. Crittenden, S. H. David, W. Hand, and S. A. Green, *Water Res.* **33** (10), 2315 (1999).
11. W. Kowalski, *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook. UVGI for Air and Surface Disinfection* (Springer, New York, 2009).
12. A. S. Kamrukov, S. G. Kireev, N. P. Kozlov, and S. G. Shashkovskiy, *J. Appl. Spectrosc.* **84** (4), 657 (2017).
13. S. N. Belov, M. I. Demidov, N. N. Ogurtsova, I. V. Podmoshenskii, P. N. Rogovtsev, and V. M. Shelemina, *J. Appl. Spectrosc.* **10** (3), 408 (1969).
14. A. G. Simakin, *Optimization and design of gas-discharge optical radiation devices of enhanced reliability for use in electronic devices* (PHD work, Vladikavkaz, 2010) [in Russian].
15. A. S. Kamrukov and A. I. Kulebyakina, *Engineering calculation methods for characteristics of flash xenon lamps* (NITs «Engineer», Moscow, 2010) [in Russian].