

04, апрель 2016

УДК 621.327.7, 628.166.085

Исследование влияния ориентации лампы на эффективность обеззараживания водных потоков в фотохимическом реакторе

Андронов С.И., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

Левичев Н.А., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

*Научный руководитель: Шашковский С.Г., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

bauman@bmstu.ru

Введение

В настоящее время ультрафиолетовые (УФ) технологии широко применяются для обеззараживания и очистки воды, как самостоятельно, так и в сочетании с другими методами. Ультрафиолетовая дезинфекция и очистка воды имеет ряд преимуществ перед другими технологиями: высокая эффективность инаktivации в отношении широкого спектра патогенных микроорганизмов, безреагентный принцип действия, отсутствие влияния на физико-химические и органолептические свойства воды, отсутствие риска передозировки [1].

Известно, что УФ излучение в диапазоне длин волн 200 – 300 нм обладает сильным бактерицидным эффектом [2]. Как правило, в качестве источника бактерицидного УФ излучения применяются ртутные лампы низкого давления, которые имеют линейчатый спектр излучения с резонансной линией 253,7 нм, лежащей вблизи максимума кривой бактерицидной эффективности [1].

Другим источником УФ излучения являются импульсные ксеноновые лампы. Спектральное распределение энергии излучения этих ламп является непрерывным в диапазоне 180 – 1100 нм. Такое излучение является перспективным для глубокого обеззараживания воды и ее очистки от широкого класса органических загрязнителей [3].

Методика расчета

В качестве источника бактерицидного ультрафиолетового излучения была выбрана импульсная ксеноновая лампа ИНП-05/120, работающая с частотой следования световых импульсов $f = 3,33$ Гц. Лампа имеет межэлектродное расстояние $l = 120$ мм, внутренний диаметр $d_{вн} = 5$ мм и наружный диаметр $d_{нар} = 7$ мм. Расход воды принимался $G = 5$ м³/ч.

Расчетные схемы конструкций фотохимических реакторов показаны на рисунке 1. В [4] было показано, что лампу, расположенную параллельно потоку воды, предпочтительно располагать в кварцевом чехле. Для анализа были выбраны оптимальные характерные размеры конструкции: фотохимический реактор диаметром $D_1 = 96$ мм, лампа в котором помещена в кварцевый чехол диаметром $d = 46$ мм и расположена параллельно потоку воды (рис. 1, а), и фотохимический реактор диаметром $D_2 = 120$ мм с лампой, расположенной в воде и перпендикулярно потоку воды (рис. 1, б).

Сравнение эффективности обеззараживания при различном расположении ламп проводилось по биоцидной дозе облучения, которую гарантированно получает элементарный объем воды за время прохождения им реактора. Для определения этой дозы, объем реактора разбивался на водные «поршни», которые перемещаются за время между импульсами в реакторе и неподвижны в течение каждого импульса. Предполагая, что в реакторе вода не перемешивается, можно считать, что каждый элемент в этом «поршне» облучается определенное количество раз. Суммарная доза облучения в зоне с минимальным значением биоцидной энергии являлась объектом сравнения.

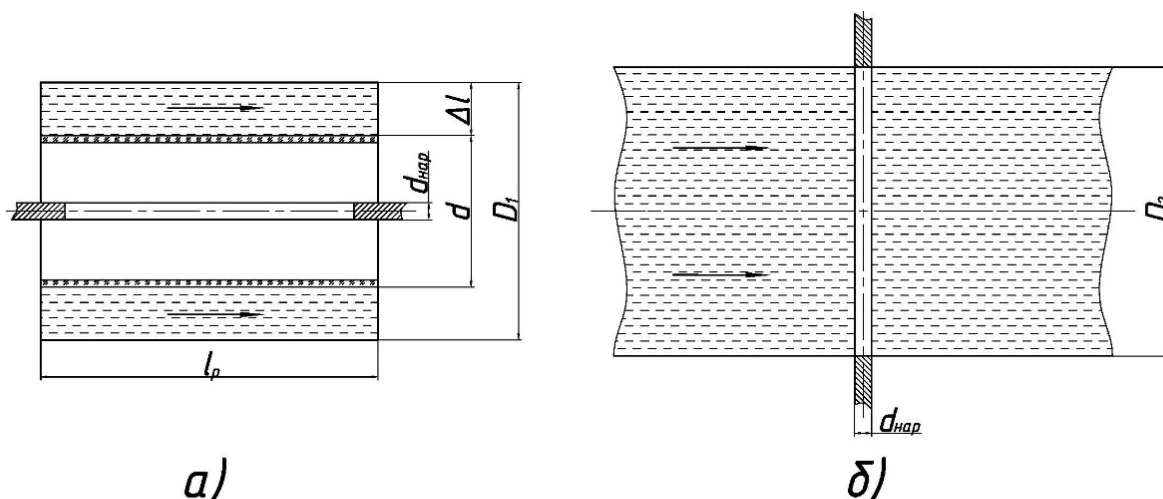


Рис. 1. Расчетные схемы фотохимических реакторов:

а – лампа расположена параллельно потоку воды; *б* – лампа расположена перпендикулярно потоку воды.

Лампа принималась за равнояркий цилиндрический источник излучения с неизлучающими торцами. Для учета косых лучей излучающий объем разбивался на N равноярких цилиндров длиной $l_i = l/N$. Для высокой точности вычислений необходимо, чтобы число разбиений было $N \geq 100$.

Дозу облучения на нормально ориентированной площадке, расположенной на расстоянии r от центра равнояркого кругового цилиндра с энергией излучения W , длиной L и диаметром D_u (рис. 2), можно рассчитать по формуле [5]:

$$H = \frac{W}{\pi^2 * r^2} * f\left(\frac{r}{L}\right), \quad (1)$$

где $f\left(\frac{r}{L}\right) = \frac{2*r^2}{4*r^2+L^2} + \frac{r}{L} * \arctg\left(\frac{L}{2*r}\right)$ — функция, учитывающая конечные размеры источника излучения; H — доза облучения, Дж/м².

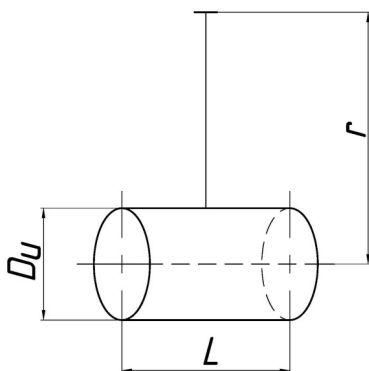


Рис. 2. Равнояркий круговой цилиндр

Для расчета дозы на площадке, нормаль которой не приходит в центр боковой грани цилиндра (рис. 3), использовалась следующая формула:

$$H = \frac{W}{\pi^2 * r^2} * f\left(\frac{r}{L}\right) * \cos(\alpha), \quad (2)$$

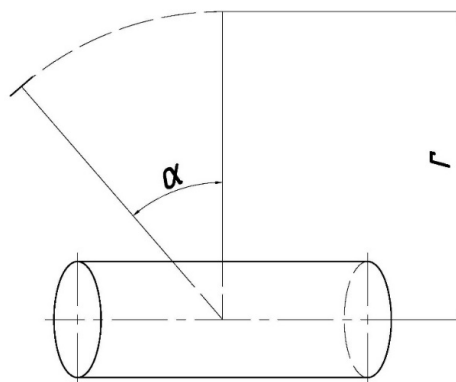


Рис. 3. Расчет дозы облучения в произвольной области

Важным фактором при расчете дозы облучения является поглощение излучения водой, зависящее от физико-химических показателей воды. Наибольшее поглощение вызывает цветность воды, тогда как содержание в ней солей жесткости оказывает на поглощение малое влияние. Поэтому ввиду различного качества воды для анализа были взяты: дистиллированная вода [6], очищенная вода [7], отвечающая действующим нормативам показателей качества воды, и сточная вода [8]. Спектры поглощения биоцидного УФ излучения этих вод приведены на рисунке 4.

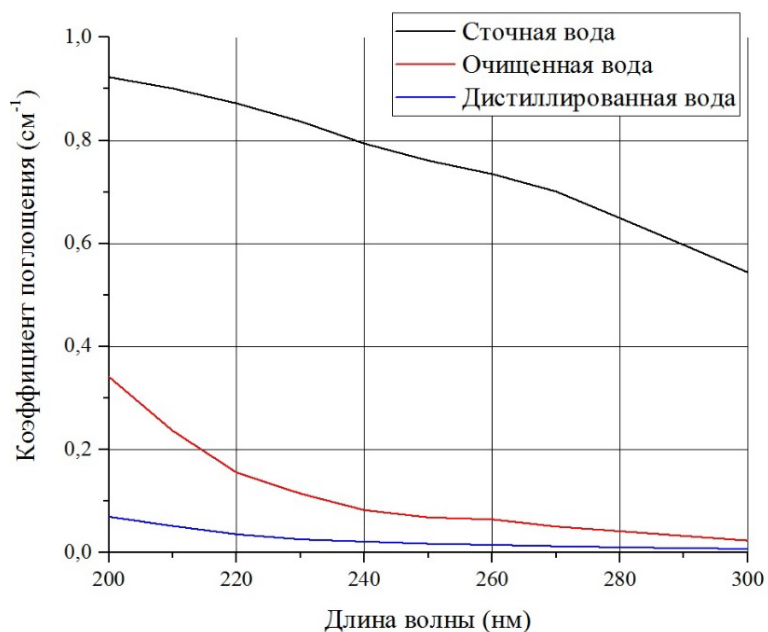


Рис. 4. Спектры поглощения излучения для воды

Ослабление излучения в поглощающей среде определяется законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$H = H_0 * e^{-\kappa * \Delta}, \quad (3)$$

где Δ — путь, проходимый светом в поглощающей среде, см.

С помощью спектрометра AvaSpec-ULS2075XL было измерено спектральное распределение энергии излучения в УФ области спектра, которое представлено на рисунке 5.

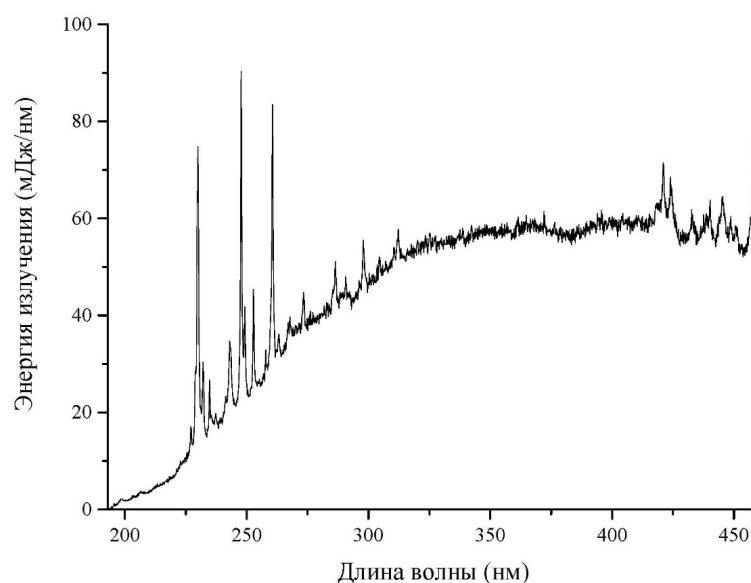


Рис. 5. Спектральное распределение энергии излучения лампы ИПП-05/120

Используя (2–3) и суммируя дозу облучения от каждого из N источников, получили дозу облучения для расчетных схем реакторов различной конфигурации (см. рис. 1).

Результаты расчета

В результате расчета были получены значения дозы в области минимальной облученности для реакторов с осевой и перпендикулярной ориентацией лампы относительно водного потока и для воды с различными коэффициентами поглощения (см. рис. 4). Результаты расчетов дозы облучения представлены на рисунках 6-8, а значения в различных спектральных интервалах сведены в таблицу (Д – дистиллированная вода; О – очищенная вода; С – сточная вода). Сравнение реакторов проводилось по дозе в двух спектральных диапазонах: 200 – 230 нм, отвечающий за прямой фотолиз многих органических соединений, и 200 – 300 нм, обладающий биоцидным эффектом.

Результаты расчетов минимальной дозы облучения

Диапазон	200-230 нм			200-300 нм		
Вода	Д	О	С	Д	О	С
Лампа потоку	1,7 Дж/м ²	1,3 Дж/м ²	0,3 Дж/м ²	20 Дж/м ²	18 Дж/м ²	4,7 Дж/м ²
Лампа ⊥ потоку	5 Дж/м ²	2,1 Дж/м ²	0,03 Дж/м ²	67 Дж/м ²	48 Дж/м ²	0,9 Дж/м ²



Рис. 6. Результаты расчета дозы облучения для сточной воды

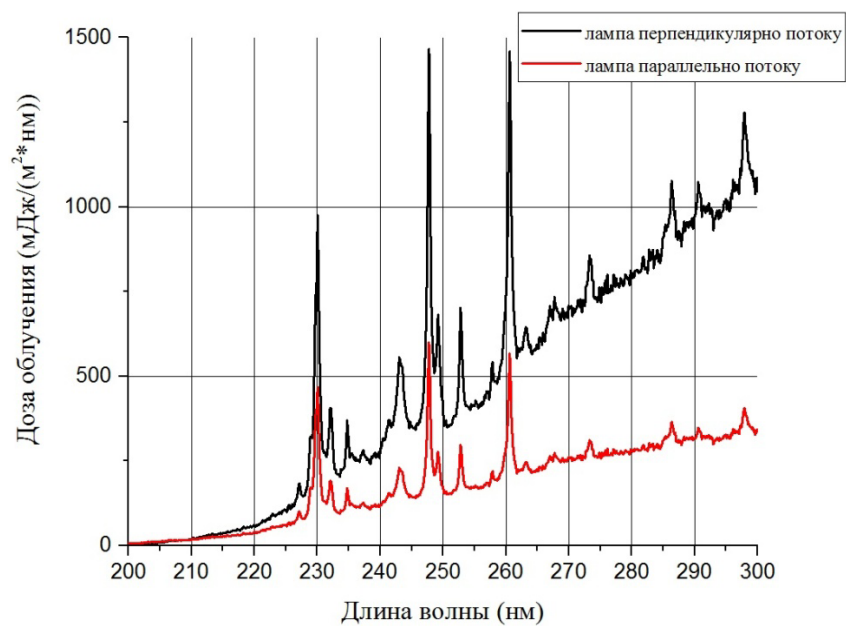


Рис. 7. Результаты расчета дозы облучения для очищенной воды

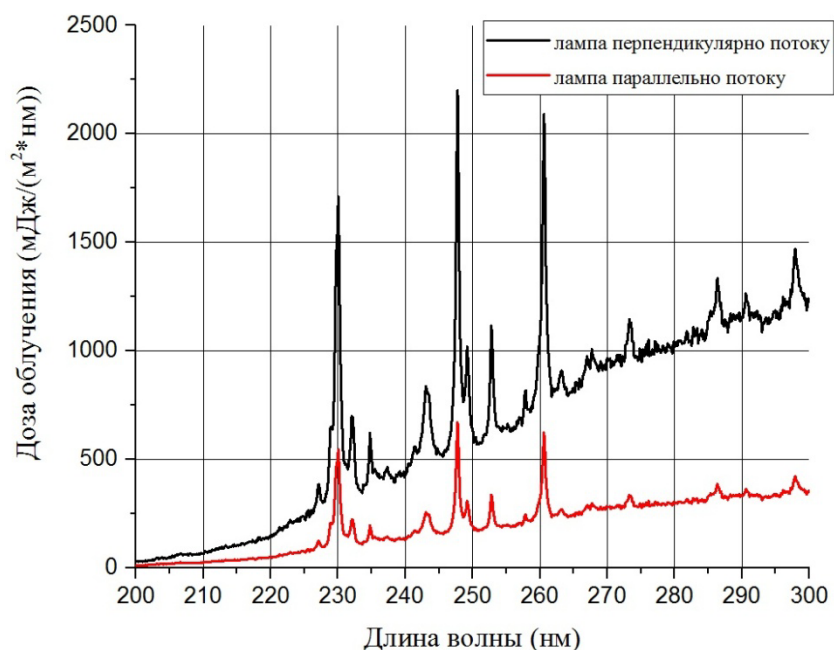


Рис. 8. Результаты расчета дозы облучения для дистиллированной воды

Выводы

Расположение лампы перпендикулярно направлению потока воды позволяет достичь больших бактерицидных доз и, следовательно, больших значений эффективностей обеззараживания для дистиллированной и очищенной воды. В случае сточной (сильно загрязненной) воды предпочтительно ориентировать лампу параллельно потоку, поскольку при этом уменьшаются потери на поглощение в тонком слое воды. Также при расположении лампы параллельно потоку доза облучения в меньшей степени зависит от оптических характеристик воды. При расположении лампы перпендикулярно потоку увеличение коэффициента поглощения воды резко уменьшает эффективность обеззараживания, поскольку облучение происходит в том же толстом слое воды.

При значениях коэффициентов поглощения воды $\kappa < 0,25 \text{ см}^{-1}$ предпочтительно располагать лампу перпендикулярно направлению потока воды.

Дополнительного увеличения эффективности обеззараживания можно достичь за счет принудительной турбулизации потока воды, совмещая таким образом преимущества обеих схем.

Список литературы

- [1]. Кармазинов Ф.В., Костюченко С.В. и др. Ультрафиолетовые технологии в современном мире: коллективная монография / под ред. Ф.В. Кармазинова,

- С.В. Костюченко, Н.Н. Кудрявцева, С.В. Храменкова. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. 392 с.: цв. вкл.
- [2]. Владимиров Ю.А., Потапенко А.Я. Физико-химические основы фотобиологических процессов: учебник для вузов. М.: Дрофа, 2006. 285 с.: ил.
- [3]. Камруков А.С., Козлов Н.П., Селиверстов А.Ф., Шашковский С.Г., Яловик М.С. Фотохимическая очистка воды широкополосным импульсным ультрафиолетовым излучением // Безопасность в техносфере. 2006. № 1. С. 38-44.
- [4]. Левичев Н.А. Оптимизация конструкции фотохимических реакторов для обеззараживания воды импульсными ксеноновыми лампами // Молодежный научно-технический вестник. Электрон. журн. 2015. № 9. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/802138.html> (дата обращения 11.10.2015).
- [5]. Григорьев Б.А. Импульсный нагрев излучениями. В 2 ч. Ч. 1. Характеристики импульсного облучения и лучистого нагрева. М.: Наука, 1974. 318 с.
- [6]. Refractive index database. Available at: <http://refractiveindex.info/>, accessed 28.09.2015.
- [7]. Беломорская биологическая станция им. Н.А. Перцова Биологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (ББС МГУ). Режим доступа: <http://wsbs-msu.ru/> (дата обращения 28.09.2015).
- [8]. Ульянов А.Н. Рациональные подходы при определении коэффициентов надежности для ультрафиолетовой дезинфекции // Сантехника. 2005. № 3. С. 18-24.