

#09, сентябрь 2015

УДК 621.327.7, 628.166.085

## **Оптимизация конструкции фотохимических реакторов для обеззараживания воды импульсными ксеноновыми лампами**

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

*Научный руководитель: Шашиковский С.Г., к.т.н., доцент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
кафедра «Плазменные энергетические установки»  
[bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)*

### **Введение**

Ультрафиолетовое (УФ) излучение в последние годы широко применяется для обеззараживания воды, как самостоятельно, так и в сочетании с другими методами. Ультрафиолетовая дезинфекция воды имеет ряд преимуществ перед другими технологиями: высокая эффективность против широкого спектра патогенных микроорганизмов, отсутствие необходимости в дополнительных химических веществах, минимальное образование побочных продуктов, отсутствие влияния на вкус и запах воды, отсутствие риска передозировки [1, 2].

УФ излучение в диапазоне длин волн 200–315 нм обладает способностью инактивировать микроорганизмы в результате фотодеструкции элементов клетки [3, 4].

Обычно 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 биоцидной эффективности [1]. Другим эффективным генератором УФ излучения являются импульсные ксеноновые лампы. Спектр излучения таких ламп — сплошной; их использование особенно эффективно для обеззараживания воды от устойчивых форм бактерий и вирусов, так как инактивация микрофлоры происходит в результате многоканального механизма деструкции всех составляющих клетки [5]. По сравнению с ртутными лампами установки с импульсными лампами обладают возможностью мгновенного запуска, что особо важно при создании автоматизированных установок.

## Методика расчета

Расчетные схемы конструкции реакторов показаны на рис. 1. В качестве источника биоцидного УФ излучения была выбрана лампа ИНП-7/120, работающая с частотой следования световых импульсов  $f = 4$  Гц. Лампа имеет межэлектродное расстояние  $l = 0,12$  м и наружный диаметр  $d_{нар} = 0,01$  м. Расход воды составлял  $G = 2$  м<sup>3</sup>/ч.

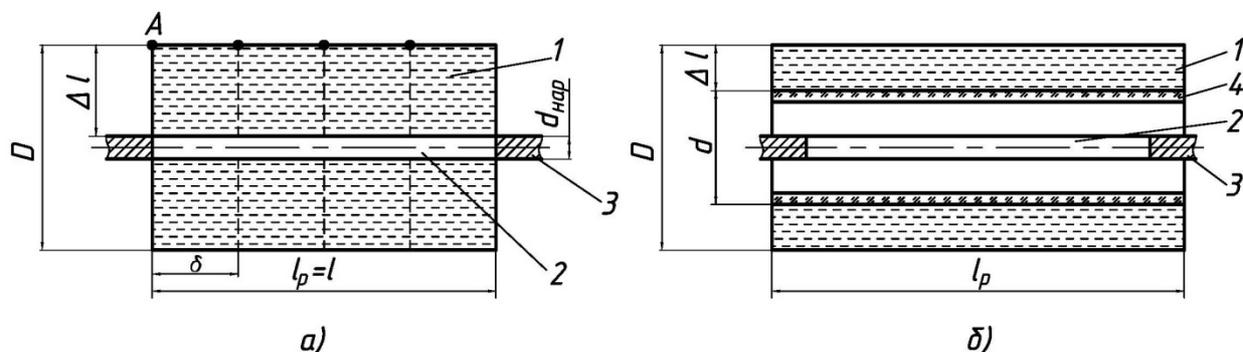


Рис. 1. Расчетные схемы фотохимических реакторов:

*a* – лампа погружена в воду; *б* – лампа находится в кварцевом чехле.

1 – облучаемый объем воды; 2 – излучающий канал лампы; 3 – электроды лампы;  
4 – кварцевый чехол.

Сравнение конструкций реактора проводилось по минимальной биоцидной дозе облучения, определяющей эффективность обеззараживания. Для нахождения этой дозы, объем реактора разбивался на водные «поршни», которые перемещаются за время между импульсами в реакторе и неподвижны в течение импульса. Таким образом, каждый элемент в этом «поршне» облучается несколько раз. Доза облучения в зоне с минимальным значением биоцидной энергии являлась объектом сравнения. На рис. 1 показано разбиение объема воды на «поршни» и область минимальной облученности *A* для реактора с лампой, погруженной в воду. Аналогичное разбиение проводилось для реактора, в котором лампа помещена в кварцевый чехол.

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  $D_{и}$  (рис. 2), можно рассчитать по формуле [6]:

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

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

Из (1) можно получить выражения для дозы облучения в относительных единицах, поскольку энергия излучения лампы  $W$  одинакова для всех расчетных случаев:

$$h_0 = \frac{H}{W} = \frac{1}{\pi^2 * r^2} * f\left(\frac{r}{L}\right). \quad (2)$$

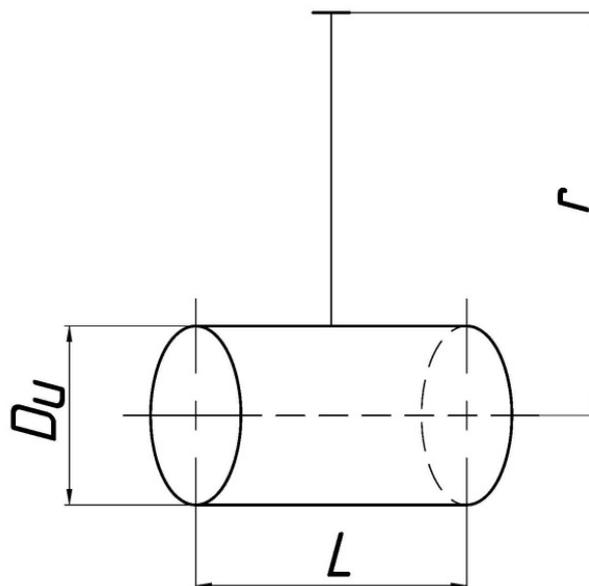


Рис. 2. Равнояркий круговой цилиндр

Для расчета дозы на площадке, нормаль которой не приходит в центр боковой грани цилиндра использовался метод добавления источников излучения (рис. 3). Добавляя  $2i + 1$  эквивалентных источников излучения и преобразуя (2), можно вычислить дозу, полученную от цилиндрического источника излучения в любой области:

$$h_0 = \frac{1}{2 * \pi^2 * r^2} * \left[ (i + 1) * f\left(\frac{r}{2 * L * (i + 1)}\right) - i * f\left(\frac{r}{2 * L * i}\right) \right], \quad (3)$$

где  $i = L_{\text{дон}}/L$  — число источников излучения, добавленных до нормали от облучаемой площадки.

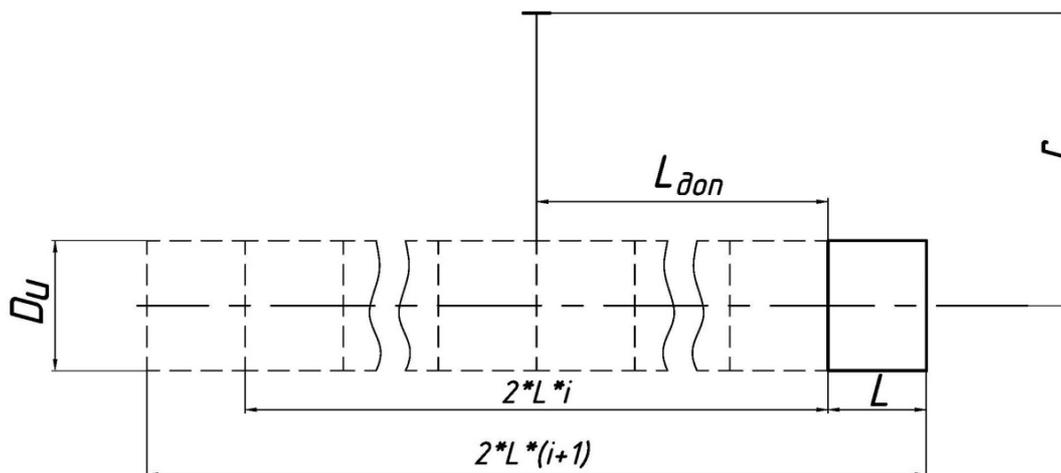


Рис. 3. Метод добавления источников излучения

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. Для питьевой воды, отвечающей действующим нормативам по показателям качества воды (СанПиН 2.1.4.1074-01), коэффициент поглощения  $\kappa$  изменяется в пределах  $0,1 - 0,3 \text{ см}^{-1}$ . При этом: для бесцветных вод, получаемых из глубоких подземных горизонтов  $\kappa = 0,1 \text{ см}^{-1}$ ; для родниковой, грунтовой и инфильтрационной воды  $\kappa = 0,15 \text{ см}^{-1}$ ; для обработанной воды поверхностных источников водоснабжения  $\kappa = 0,3 \text{ см}^{-1}$  [7].

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

$$h = h_0 * e^{-\kappa * \Delta}, \quad (4)$$

где  $\Delta$  — путь, проходимый светом в поглощающей среде, см.

Характерной особенностью реактора, в котором лампа находится в кварцевом чехле, является наличие переходов между оптически неоднородными средами. При переходе излучения из оптически более плотной среды (кварц) в оптически менее плотную среду (вода) сказывается эффект полного внутреннего отражения. Угол полного отражения в данном случае вычислялся как:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \arcsin\left(\frac{1,46}{1,38}\right) \approx 70^\circ, \quad (5)$$

где  $n_2$  и  $n_1$  — показатели преломления кварцевого чехла и воды для длины волны биоцидной области спектра [1].

Учет преломления излучения был проведен в работе [8]. Поскольку осуществляется переход из оптически менее плотной среды в более плотную, а затем наоборот, то преломление излучения можно не учитывать, что дает приемлемую погрешность в расчетах.

Коэффициент пропускания кварцевой стенки в биоцидной области излучения принимался  $K_{cm} = 0,9$  [9].

Используя (3–5) и суммируя дозу облучения от каждого из  $N$  источников, получили дозу в области минимальной облученности для реакторов различной геометрии.

### **Результаты расчета**

Для расчета были выбраны характерные варианты конструкции фотохимического реактора с импульсной ксеноновой лампой (см. рис. 1). На рис. 4 приведена зависимость минимальной дозы облучения, полученной водой за время нахождения в реакторе,  $h$  в относительных единицах от коэффициента поглощения воды  $\kappa$  в  $\text{см}^{-1}$ .

Из рис. 4 видно, что использовать кварцевый чехол диаметром  $d < 0,025$  м не целесообразно (кривая 2), поскольку происходят большие потери в результате эффекта полного внутреннего отражения на границе двух оптически неоднородных сред (кварц и вода). Для воды с коэффициентом поглощения  $\kappa = 0,2 \text{ см}^{-1}$  доза облучения реактора, лампа которого погружена в воду, и реакторов с лампой, расположенной в кварцевом чехле, примерно одинакова (см. рис. 4). Поскольку доза облучения обратно пропорциональна квадрату расстояния, то использование кварцевого чехла диаметром  $d > 0,065$  м не эффективно.

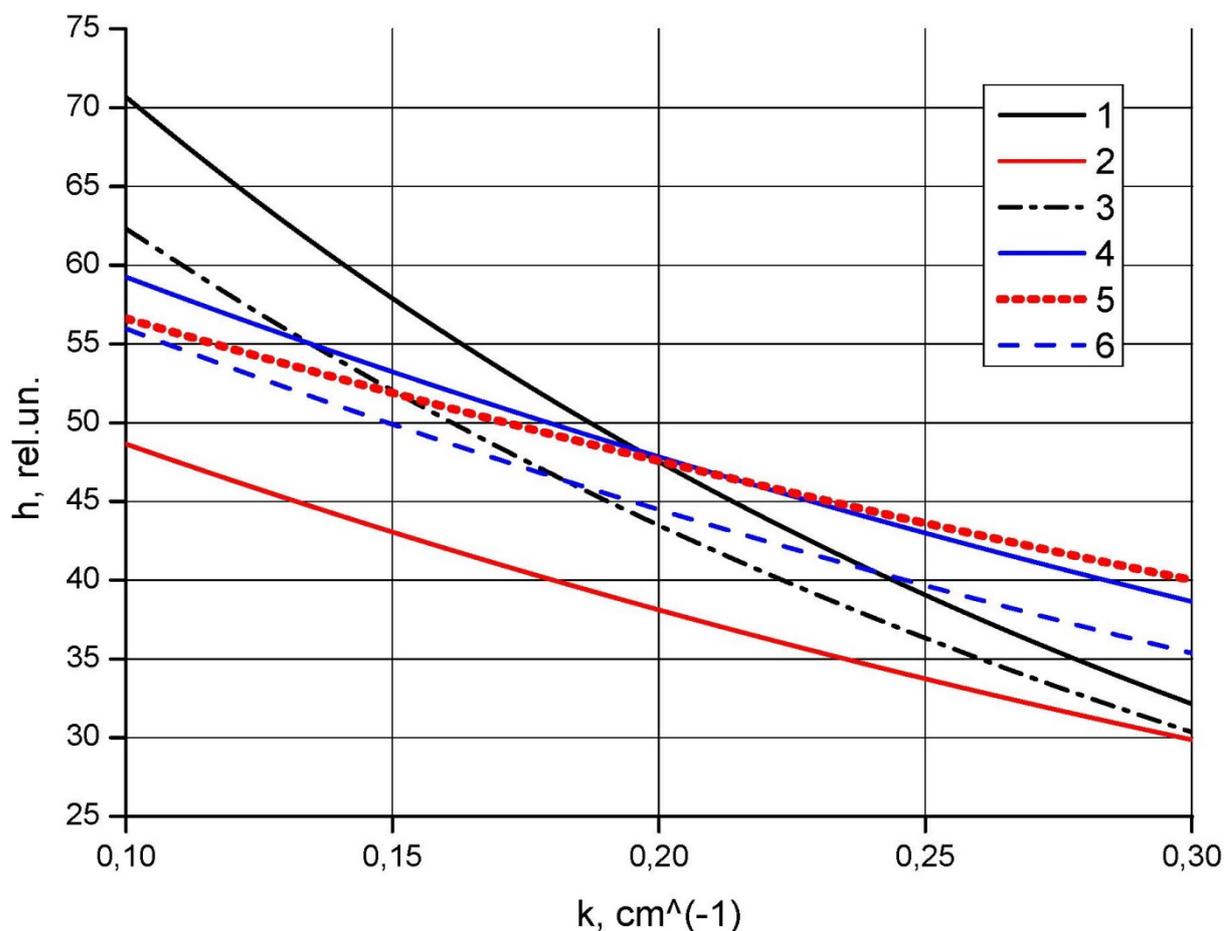


Рис. 4. Результаты расчетов минимальной дозы облучения:

1 – лампа погружена в воду ( $D = 0,078$  м,  $\Delta l = 0,034$  м); 2 – лампа находится в кварцевом чехле ( $d = 0,025$  м,  $D = 0,071$  м,  $\Delta l = 0,023$  м); 3 – лампа находится в кварцевом чехле ( $d = 0,032$  м,  $D = 0,100$  м,  $\Delta l = 0,034$  м); 4 – лампа находится в кварцевом чехле ( $d = 0,040$  м,  $D = 0,078$  м,  $\Delta l = 0,019$  м); 5 – лампа находится в кварцевом чехле ( $d = 0,060$  м,  $D = 0,090$  м,  $\Delta l = 0,015$  м); 6 – лампа находится в кварцевом чехле ( $d = 0,032$  м,  $D = 0,074$  м,  $\Delta l = 0,021$  м)

### Выводы

Оптические характеристики воды определяют расположение лампы, геометрические параметры реактора и эффективность обеззараживания воды.

Для обеззараживания воды высокого качества с коэффициентом поглощения  $\kappa < 0,2$  см<sup>-1</sup> целесообразно располагать лампу в воде.

Для обеззараживания загрязненной воды с коэффициентом поглощения  $\kappa > 0,2$  см<sup>-1</sup> предпочтительнее помещать лампу в кварцевый чехол диаметром  $d = 0,04 - 0,06$  м.

Кроме того, реактор с кварцевым чехлом обладает лучшими эксплуатационными характеристиками: грязезащита источника излучения, удобство замены лампы, контроль

светоотдачи. При этом потери относительно расположения лампы в воде при коэффициенте поглощения  $\kappa = 0,15 \text{ см}^{-1}$  не превышают 10 %.

### Список литературы

1. Кармазинов Ф.В., Костюченко С.В. 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. Багров В.В., Десятов А.В., Казанцева Н.Н. и др. Вода: эффекты и технологии / под ред. А.В. Десятова. М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2010. 488 с.
3. Владимиров Ю.А., Потапенко А.Я. Физико-химические основы фотобиологических процессов: учебник для вузов. М.: Дрофа, 2006. 285 с.: ил.
4. Самойлова К.А. Действие ультрафиолетовой радиации на клетку. Л.: Наука, 1967. 145 с.
5. 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.
6. Григорьев Б.А. Импульсный нагрев излучениями. В 2 ч. Ч. 1. Характеристики импульсного облучения и лучистого нагрева. М.: Наука, 1974. 318 с.
7. Кожин В.Ф. Очистка питьевой и технической воды. Примеры и расчеты: учеб. пособие для вузов. 4-е изд., репринтное. М.: ООО «БАСТЕТ», 2008. 304 с.: ил.
8. Bolton J.R. Calculation of ultraviolet fluence rate distribution in an annular reactor: Significance of refraction and reflection // Water Research. 2000. Vol. 34. P. 3315-3324.
9. ЗАО «Фарм-Инвест». Режим доступа: <http://www.farm-invest.ru/> (дата обращения 20.02.2015).