

УДК 004.94
EDN: SCWEII

PACS: 42.72.Bj, 07.05.Tr



Оптимизация конструкции ультрафиолетовых облучателей открытого типа

Д. Е. Науменко, В. А. Левченко, А. И. Васильев

Исследовано распределение и поток ультрафиолетового излучения в пространстве вокруг напольных облучателей открытого типа с различным количеством и расположением ламп. Разработана расчётная модель облучателя, состоящего из газоразрядных амальгамных ламп низкого давления и непрозрачных элементов конструкции круглого сечения, учитывающая точки расположения и размеры всех поглощающих элементов конструкции. В результате экспериментов и компьютерного моделирования было показано, каким образом необходимо располагать газоразрядные лампы для достижения наилучшего коэффициента использования бактерицидного потока. Результаты расчётной модели совпадают с экспериментальными результатами.

Ключевые слова: ультрафиолетовое излучение, открытые облучатели, коэффициент использования бактерицидного потока, газоразрядные лампы, амальгамные лампы, затенение, компьютерное моделирование.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-3-99-103

Введение

Одно из главных применений бактерицидного ультрафиолетового излучения (далее «УФ-излучения») – обеззараживание помещений, в том числе различных поверхностей, в общественных местах с целью предотвращения распространения инфекций [1, 2]. Для гарантированной инактивации микроорганиз-

мов, необходимо обеспечить определённую дозу (флуенс) УФ-излучения. Полученная доза пропорциональна времени обработки и облучённости, создаваемой на поверхности источником УФ-излучения. Вследствие конструктивных особенностей облучателя, излучение, генерируемое УФ-лампами облучателя, распределяется неравномерно: например, при наблюдении облучателя под определёнными углами вертикальные элементы конструкции могут частично или полностью перекрывать часть ламп, т. е. происходит их затенение, в результате чего часть УФ-потока теряется, а распределение УФ-излучения становится неоднородным. В общей практике для упрощения расчёта времени обработки (экспозиции) считают, что излучение распределено равномерно по всем направлениям (в плоскости, перпендикулярной осям ламп), а УФ-мощность облучателя умножают на поправочный коэффициент 0,4, согласно руководству Р 3.5.1904-04 [3]. Такое решение не является оптимальным, так как этот коэффициент (коэффициент использования бактерицидного потока, далее k) может быть, как больше, так и

Науменко Данила Евгеньевич¹, студент.

E-mail: i@ddannaum.ru

Левченко Владимир Александрович², зам. зав. лабораторией, к.ф.-м.н.

Васильев Александр Иванович², гл.н.с., к.х.н.

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).
Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

²НПО «ЛИТ».

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Лихачёвский пр-д, 25.

Статья поступила в редакцию 18.03.2024

После доработки 3.04.2024

Принята к публикации 10.04.2024

Шифр научной специальности: 1.3.2

меньше 0,4, в зависимости от конструкции конкретного устройства. Эффект затенения ламп приводит к тому, что даже поверхности, находящиеся рядом, наберут различную дозу за время экспозиции, что в случае недобора дозы приведёт к недостаточной степени обеззараживания. Иными словами, согласно данному руководству, существующая проблема неравномерного распределения потока УФ-излучения от облучателей будет решена тривиально, но не оптимально. На сегодняшний день многие коллективы предлагают свои решения этой проблемы с использованием различных современных технологий, в том числе робототехники [4, 5] и CFD-расчётов [6, 7].

Распределение потока УФ-излучения можно оптимизировать с помощью выбора компоновки облучателя, увеличив k . Это позволит набирать заданную дозу быстрее, что даст возможность использовать облучатель более эффективно, например, обработать больше помещений за то же время, или одно, но за меньший промежуток времени, что важно, например, при обработке операционных в медучреждениях. В тех случаях, когда скорость обработки не важна, сокращение времени экспозиции поможет сэкономить электроэнергию. Сократить время и ресурсы на поиск решения для оптимальной компоновки облучателя можно с помощью компьютерного моделирования. Цель данной работы – оптимизация конструкций открытых облучателей с помощью компьютерного моделирования и их экспериментальная проверка.

Эксперимент и расчётная модель

Разработанная расчётная модель облучателя учитывала расположение всех источников УФ-излучения в пространстве, геометрические размеры ламп (как в качестве излучателей, так и в качестве поглотителей) и непрозрачных элементов конструкции, а также коэффициент поглощения УФ-излучения для горящих ламп. Коэффициент поглощения горячей газоразрядной амальгамной лампы низкого давления был измерен отдельно и составил $0,85 \pm 0,03$. При моделировании облучателя с вертикально расположенными лампами проводились расчёты распределения УФ-излучения в горизонтальной плоскости,

проходящей через середины межэлектродных расстояний всех ламп. Полученные расчётные данные нормировались на значение облучённости E_n , которое было бы измерено датчиком от одной газоразрядной лампы с эквивалентными размерами, но с мощностью, равной суммарной мощности всех ламп в установке. Для определения величины E_n был применен метод Кайтца [8]:

$$\Phi = \frac{2E\pi^2LD}{2\alpha + \sin 2\alpha}, \quad (1)$$

где Φ – энергетический УФ-поток или поток УФ-излучения, E – энергетическая освещённость или облучённость, L – протяжённость источника света, D – нормальное расстояние от точки наблюдения до источника, α – угол, под которым видна лампа из точки наблюдения, который вычисляется по формуле:

$$\alpha = 2\arctg(L/2D). \quad (1)$$

Коэффициент использования бактерицидного потока k для УФ-облучателя определяется, как отношение минимального значения облучённости, полученного в точке пространства, находящейся на расстоянии D от центра облучателя в горизонтальной плоскости, к нормировочному значению E_n .

Для экспериментальной проверки компьютерной оптимизации конструкций открытых облучателей с параметром оптимизации k было проведено исследование распределения УФ-излучения в пространстве при различных компоновках облучателей содержащих 3, 4 и 6 ламп, установленных симметрично на равных расстояниях R относительно центрального непрозрачного элемента конструкции. В облучатель устанавливались прямые газоразрядные амальгамные лампы низкого давления с мощностью УФ-излучения на длине волны 254 нм 105 Вт, диаметром 28 мм и длиной 1100 мм. Непрозрачные элементы конструкции имели диаметр 25 мм и длину 1100 мм. Облучатель с лампами, элементами конструкции и источниками питания ламп свободно вращался вокруг центрального непрозрачного элемента конструкции. Замер облучённости E проводился солнечно-слепым датчиком SED240\W радиометра ILT5000 с максимумом чувствительно-

сти на длине волны 254 нм, расположенным на расстоянии 3 метра от центрального элемента конструкции на высоте, соответствующей середине межэлектродного отрезка в лампах. Расстояние 3 метра выбрано как оптимальное для диапазона линейности измерений датчика SED240\W. Для исследования распределения УФ-потока вокруг облучателя проводилось измерение облучённости в зависимости от угла поворота облучателя в 240 различных точках, расположенных равномерно вокруг облучателя в горизонтальной плоскости, таким образом, шаг между соседними точками составлял 1,5 градуса. После проведения замеров по всем углам вокруг облучателя, выбирался следующий радиус расположения ламп R в пределах от 65 мм до 185 мм с шагом 20 мм. Полученные значения облучённости нормировались на то же нормировочное значение E_n , что и результаты моделирования.

Результаты и обсуждение

На Рис. 1 приведён пример сравнения результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных для шестилампового облучателя, радиус расположения ламп в котором составляет 6,5 см. Можно видеть, что характер распределения УФ-излучения, полученного экспериментально и рассчитанного с помощью моделирования, близки друг к другу. Приведённые зависимости имеют коэффициент корреляции $0,82 \pm 0,03$. Наибольший интерес представляют точки ми-

нимума графиков, так как отношение минимальной облучённости к E_n – и есть k по определению.

На Рис. 2 представлены расчетные и экспериментальные зависимости коэффициента использования бактерицидного потока от радиуса расположения ламп для различных компоновок. Для величины потока значение 1 соответствует УФ-потоку для идеальной системы без поглощения. Как видно из рисунка 2б, для четырёх ламп коэффициент использования бактерицидного потока даже без оптимизации составляет 0,5, что превышает рекомендованный руководством Р 3.5.1904-04 коэффициент 0,4 на 20 %. Следовательно, установка всегда обеспечивает дозу на 20 % больше заявленной. Однако в противовес такому достоинству появляется важный недостаток: вследствие своей симметричности относительно двух плоскостей, для этих компоновок нет возможности значительно увеличить коэффициент использования бактерицидного потока.

Из графиков на рисунке 2а и 2в видно, что для 3 и 6 ламп при используемом в некоторых серийных облучателях радиусе, равном 10,5 см, значение коэффициента почти не отличается от рекомендованного в руководстве Р 3.5.1904-04. Однако, при увеличении радиуса до 18,5 см коэффициент использования бактерицидного потока можно повысить до 0,58 в трёхламповом и 0,51 в шестиламповом УФ-облучателях, что, соответственно, на 45 % и 28 % лучше исходных значений.

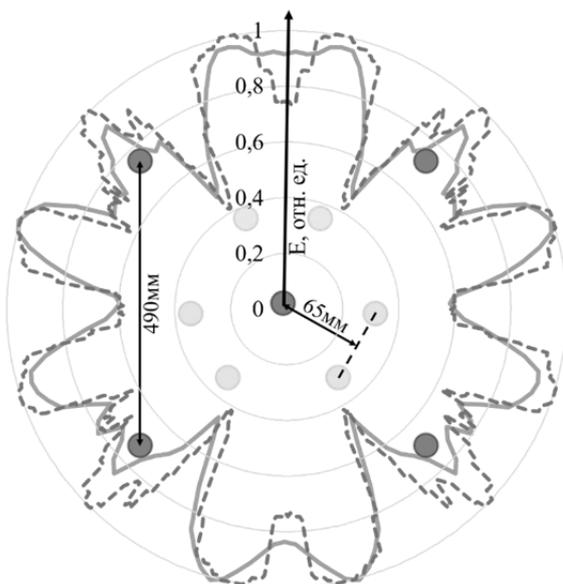


Рис. 1. Угловая диаграмма распределения УФ-излучения. Эксперимент – сплошная линия, расчёт – пунктирная. 6 ламп обозначены серыми кружками, 5 непрозрачных элементов конструкции – тёмными кружками

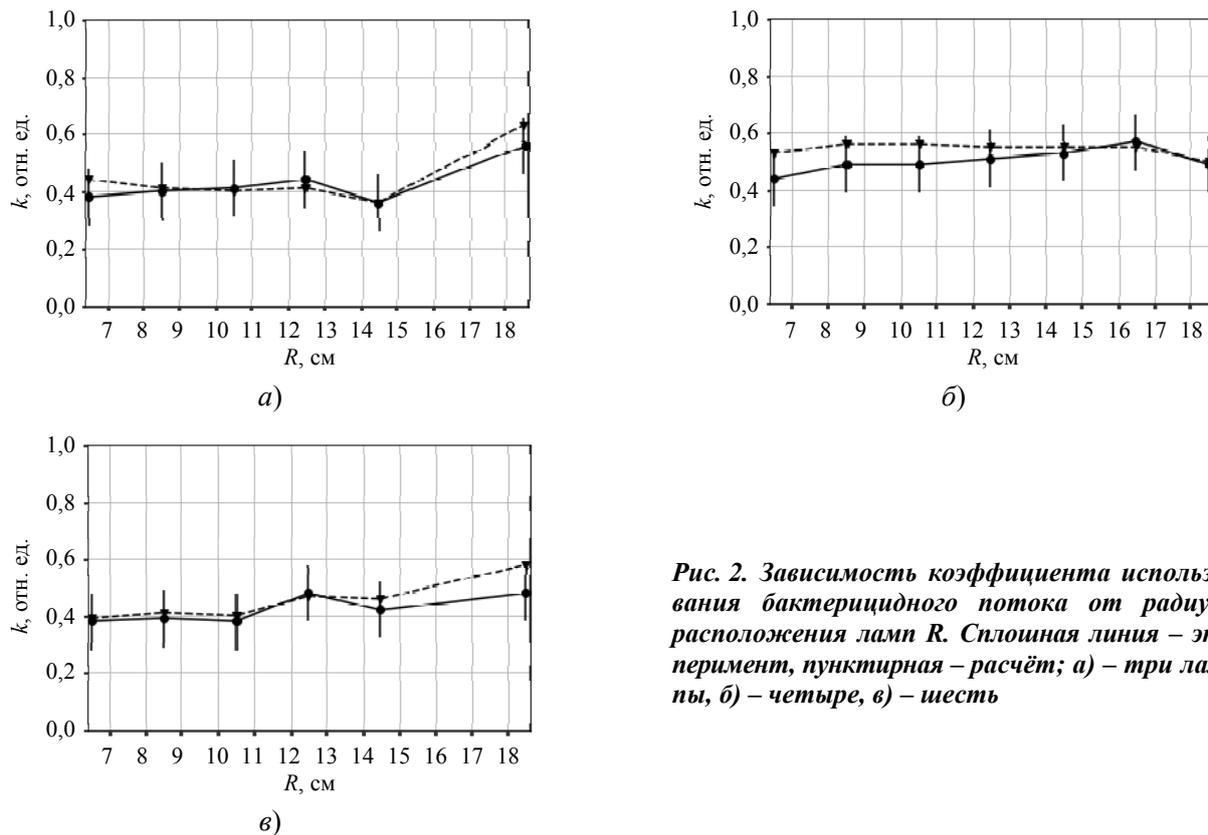


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования бактерицидного потока от радиуса расположения ламп R . Сплошная линия – эксперимент, пунктирная – расчёт; а) – три лампы, б) – четыре, в) – шесть

Заключение

Следует отметить, что рекомендованный в руководстве Р 3.5.1904-04 коэффициент использования УФ-потока 0.4 для открытых облучателей заведомо выполняется для рассмотренных в работе устройств. Как показало моделирование и экспериментальные измерения, в отдельных случаях можно повысить коэффициент использования УФ-потока открытых облучателей до 60 %, что означает уменьшение времени обработки в 1,5 раза. Созданная расчётная модель описывает распределение УФ-излучения вокруг облучателей с коэффициентом корреляции с экспериментом $0,82 \pm 0,03$ и может быть использована для оптимизации конструкций облучателей. Это даёт возможность сэкономить ресурсы на производство опытных образцов облучателей и время на проведение опытов по определению коэффициента использования УФ-потока для нового оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костюченко С. В., Васильев А. И., Ткачев А. А., Загайнова А. В., Курбатов И. В., Абрамова И. А., Юдин С. М., Грицюк О. В. / Гигиена и санитария. 2021. Т. 100. № 11. С. 1229–1235.
2. Ультрафиолетовые технологии в современном мире / под ред. Кармазинов Ф. В., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Храменков С. В. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012.
3. Шандала М. Г., Абрамова Е. М., Соколова И. Ф., Юзбашев В. Г., Пальцев Ю. П., Иванцова Т. В., Цирулин А. В., Вассерман А. Л., Лаврова Р. Г. Р 3.5.1904-04, Использование ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях. – М.: Минздрав, 2004.
4. Perminov S., Mikhailovskiy N., Sedunin A., Okunevich I., Kalinov I., Kurenkov M., Tsetsrukou D. / 17th International Conference on Automation Science and Engineering. № 17. – Lyon, 2021. P. 2147–2152.
5. Haag C. W., Holliday G., Archulet K., Tang W. / Infection Control & Hospital Epidemiology. 2023. Vol. 44. № 9. P. 1505–1507.
6. Jin S., Linden K. G., Ducoste J., Liu D. / Water Research. 2005. Vol. 39. № 12. P. 2711–2721.
7. Vigstrand O. Development of an absorption model for gas discharge lamp simulation: master's thesis. – Malmo: Malmo University, 2021.
8. Lawai O., Dussert B., Howarth C., Platzner K., Sasges M., Muller J., Whitby E., Stowe R., Volker A., Witham D., Engel S., Posy P., van der Pol A. / IUVA News. 2017. Vol. 19. № 1. P. 9–16.

Optimization of the design of open-type ultraviolet irradiators

*D. E. Naumenko*¹, *V. A. Levchenko*² and *A. I. Vasiliev*²

¹Moscow Institute of Physics and Technologies
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia
E-mail: i@ddannaum.ru

²NPO "LIT"
25 Likhachevsky proezd, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received 18.03.2024; revised 3.04.2024; accepted 10.04.2024

The distribution and flux of ultraviolet radiation in the space around outdoor open-type irradiators with a different number and arrangement of lamps has been studied. A design model of an irradiator consisting of low-pressure gas-discharge amalgam lamps and power opaque structural elements of circular cross-section has been developed, taking into account the location and dimensions of all absorbing structural elements. As a result of experiments and computer simulations, it was shown how gas discharge lamps should be positioned to achieve the best utilization rate of the bactericidal flow. The results of the calculated model coincide with the experimental results.

Keywords: ultraviolet radiation, open irradiators, bactericidal flux utilization factor, gas discharge lamps, amalgam lamps, shading, computer modeling.

REFERENCES

1. Kostyuchenko S. V., Vasiliev A. I., Tkachev A. A., Zagainova A. V., Kurbatov I. V., Abramova I. A., Yudin S. M. and Gritsyuk O. V., *Hygiene & sanitation* **100** (11), 1229–1235 (2021).
2. *Ultraviolet technologies in the modern world* / ed. Karmazinov F. V., Kostyuchenko S. V., Kudryavtsev N. N., Khramenkov S. V., Dolgoprudny, Intellect Publishing House, 2012 [in Russian].
3. Shandala M. G., Abramova E. M., Sokolova I. F., Yuzbashev V. G., Fingers Yu. P., Ivantsova T. V., Tsiurilin A. V., Wasserman A. L. and Lavrova R. G., P 3.5.1904-04, The use of ultraviolet bactericidal radiation for indoor air disinfection; Moscow, Ministry of Health, 2004.
4. Perminov S., Mikhailovskiy N., Sedunin A., Okunevich I., Kalinov I., Kurenkov M. and Tsetserukou D., 17th International Conference on Automation Science and Engineering (17). Lyon, 2021, pp. 2147–2152.
5. Haag C. W., Holliday G., Archulet K. and Tang W., *Infection Control & Hospital Epidemiology* **44** (9), 1505–1507 (2023).
6. Jin S., Linden K. G., Ducoste J. and Liu D., *Water Research* **39** (12), 2711–2721 (2005).
7. Vigstrand O., Development of an absorption model for gas discharge lamp simulation: master's thesis. Malmo, Malmo University, 2021.
8. Lawai O., Dussert B., Howarth C., Platzer K., Sasges M., Muller J., Whitby E., Stowe R., Volker A., Witham D., Engel S., Posy P. and van der Pol A., *IUVA News* **19** (1), 9–16 (2017).