

Оптимизация конструкции ультрафиолетовых облучателей открытого типа

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

Аннотация

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 силовых 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.

Введение

Одно из главных применений бактерицидного ультрафиолетового излучения (далее «УФ-излучения») в наше время - обеззараживание помещений, в том числе различных поверхностей, в общественных местах с целью предотвращения распространения инфекций [1, 2]. Для гарантированной инактивации микроорганизмов, 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 по поверхностям неравномерно: например, при наблюдении облучателя под определёнными углами вертикальные силовые элементы 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 $k_{\text{ИБП}}$) может быть, как больше, так и меньше 0.4,

Науменко Данила Евгеньевич – инженер-конструктор

Левченко Владимир Александрович – заместитель заведующего фото-химической лаборатории, к.ф.-м.н

Васильев Александр Иванович – главный научный сотрудник, к.х.н.

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 CDF-расчётов [6, 7].

Оптимизировать распределение потока УФ-оборудования можно с помощью выбора компоновки облучателя, увеличив его коэффициент использования бактерицидного потока. 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.

Описание эксперимента и расчётной модели

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 силовых элементов, а также коэффициент поглощения УФ-излучения для горящих ламп. Коэффициент поглощения горячей газоразрядной амальгамной лампы низкого давления был измерен отдельно и составил 0.85 ± 0.03 . При моделировании расчёты велись в горизонтальной плоскости, включающей в себя середины межэлектродных отрезков всех ламп. Полученные расчётные данные нормировались на референсное значение E_{ref} – значение облучённости, которое было бы измерено датчиком от одной газоразрядной лампы с эквивалентными размерами, но с мощностью, равной суммарной мощности всех ламп в установке. Для определения этой величины применялся метод Кайтца [8]:

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

где Φ [Вт] – энергетический поток или поток излучения, E [Вт/м²] – энергетическая освещённость или облучённость, L [м] – протяжённость источника света, D [м] – нормальное расстояние от точки наблюдения до источника, α [рад] – угол, под которым видна лампа из точки наблюдения, который вычисляется по формуле:

$$\alpha = 2 \arctg \left(\frac{L}{2D} \right) \quad (2)$$

Для проведения экспериментальной проверки результатов оптимизации конструкций открытых облучателей с помощью компьютерного моделирования был разработан стенд, на котором исследовалась зависимость распределения УФ-излучения в пространстве вокруг различных компоновок облучателей. Стенд позволял вертикально закреплять от 1 до 8 прямых трубчатых ламп в рамках своих габаритов (49 см×49 см) на опорной вертикальной штанге диаметром 25 мм, стоящей в центре конструкции. По углам стенда располагались ещё 4 такие же вертикальные штанги, моделирующие силовые элементы для перемещения облучателя. В работе использовались компоновки с 3, 4 и 6 лампами мощностью УФ-излучения 105 Вт на длине волны 254 нм каждая. Верхняя часть стенда, на которой

крепилась лампы и все штанги, имела возможность свободно вращаться вокруг своей оси на опорном подшипнике, центральная штанга во время поворота остаётся на месте. Лампы располагаются симметрично относительно центральной штанги, на одинаковом расстоянии от неё, и имеют возможность сдвигаться ближе или дальше от центра конструкции. Далее будем называть это расстояние радиусом расположения ламп в компоновке облучателя. Для каждой компоновки производились измерения облучённости в 286 различных точках, равномерно распределённых по окружности вокруг стенда-облучателя. Измерение облучённости производилось с помощью солнечно-слепого датчика SED240\W радиометра ИЛТ5000 с максимумом чувствительности на длине волны 254 нм, расположенного на расстоянии 3 метра от центральной штанги и на высоте, соответствующей середине межэлектродного отрезка в лампах. Расстояние 3 метра выбрано как оптимальное для диапазона линейности измерений датчика SED240\W. Полученные значения облучённости нормировались на то же референсное значение E_{ref} , что и результаты моделирования.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведён пример сравнения результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных для шестиламповой установки, радиус расположения ламп в которой 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 ± 0.03 .

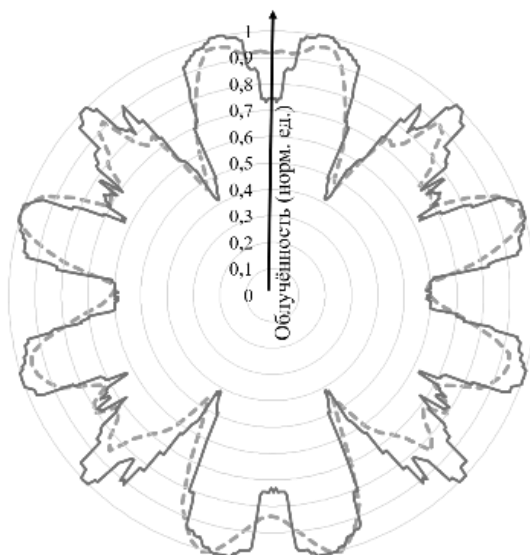


рис. 1

Сравнение экспериментально измеренного распределения УФ-излучения (пунктирная линия) и полученного при компьютерном моделировании (сплошная линия). 6 ламп в установке, радиус расположения ламп 6,5 см

Наибольший интерес представляют точки минимума графиков, так как отношение минимальной облучённости к E_{ref} – и есть $k_{ИБП}$ по определению. На рис. 2 представлены расчетные и экспериментальные зависимости коэффициента использования бактерицидного потока от радиуса расположения ламп для различных компоновок. Для потока значение 1 соответствует УФ-потoku для идеальной системы без поглощения.

Как видно из приведённых данных, для четырёхламповых компоновок (ЗБ) 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.

Если теперь обратиться к графикам зависимости коэффициента использования бактерицидного потока от радиуса расположения ламп для трёх- и шестиламповых установок, то можно увидеть, что при исходном радиусе расположения, равном 10.5 см, $k_{ИБП}$ 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 трёхламповой и 0.51 в шестиламповой установках, что, соответственно, на 45% и 28% лучше исходных значений.

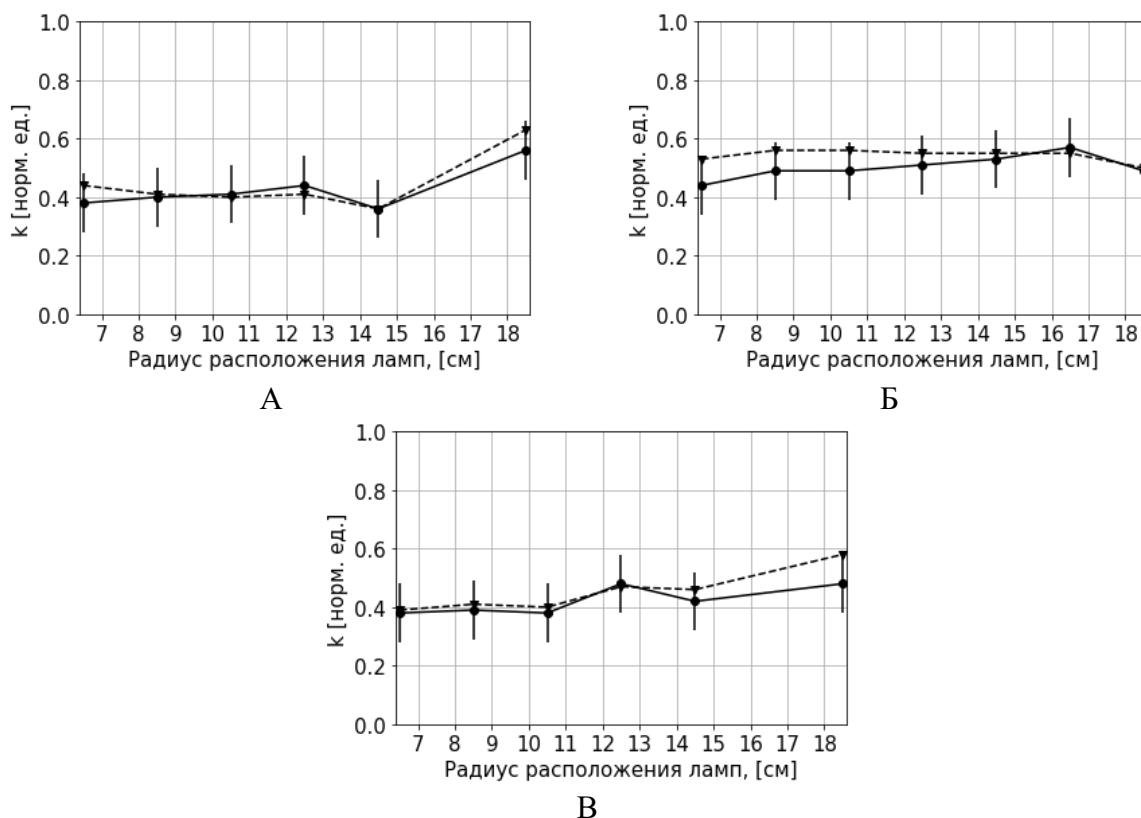


рис. 2

Зависимость коэффициента использования бактерицидного потока $k_{ИБП}$ от радиуса расположения ламп в различных компоновках:

А – трёхламповая, Б – четырёхламповая, В – шестиламповая. Сплошная линия – экспериментальные данные, пунктирная линия – результаты расчёта.

Заключение

Полученные результаты указывают на то, что созданная расчётная модель описывает распределение УФ-излучения вокруг облучателей с коэффициентом корреляции 0.82 ± 0.03 и может быть использована для оптимизации конструкций облучателей. Как показало моделирование и экспериментальные измерения, в отдельных случаях коэффициент использования бактерицидного потока можно повысить до 60%, что означает уменьшение времени обработки в 1.5 раза. Благодаря разработанной модели можно производить вычисления распределения УФ-излучения и коэффициента использования бактерицидного потока для различных конфигураций ламп ещё на этапе проектирования облучателя. Это даёт возможность сэкономить ресурсы на производство опытных образцов облучателей и

время на проведение опытов по определению коэффициента использования бактерицидного 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, 1229-1235.
- [2] Кармазинов Ф.В., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Храменков С.В., Ультрафиолетовые технологии в современном мире – Долгопрудный: ИД 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 - Москва: Минздрав, 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, pp. 2147-2152, 2021.
- [5] C. W. Haag, G. Holliday, K. Archulet, W. Tang, Infection Control & Hospital Epidemiology, 2023, vol. 44, № 9, 1505-1507.
- [6] S. Jin, K.G. Linden, J. Ducoste, D. Liu, Water Research, 2005, vol. 39, № 12, 2711-2721.
- [7] O. Vigstrand, Development of an absorption model for gas discharge lamp simulation - Malmö:Malmö 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., van der Pol A., IUVA News, 2017, vol. 19, №1, 9-16.

Optimization of the design of open-type ultraviolet irradiators

D.E. Naumenko, V.A. Levchenko, A.I. Vasiliev

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.

References

- [1] Kostyuchenko S.V., Vasiliev A.I., Tkachev A.A., Zagainova A.V., Kurbatov I.V., Abramova I.A., Yudin S.M., Gritsyuk O.V. // Hygiene and sanitation, 2021, vol. 100, № 11, 1229-1235.
- [2] Karmazinov F.V., Kostyuchenko S.V., Kudryavtsev N.N., Khramenkov S.V., Ultraviolet technologies in the modern world – Dolgoprudny: Intellect Publishing House, 2012.
- [3] Shandala M.G., Abramova E.M., Sokolova I.F., Yuzbashev V.G., Fingers Yu.P., Ivantsova T.V., Tsirulin A.V., Wasserman A.L., 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, pp. 2147-2152, 2021.
- [5] C. W. Haag, G. Holliday, K. Archulet, W. Tang, Infection Control & Hospital Epidemiology, 2023, vol. 44, № 9, 1505-1507.
- [6] S. Jin, K.G. Linden, J. Ducoste, D. Liu, Water Research, 2005, vol. 39, № 12, 2711-2721.
- [7] O. Vigstrand, Development of an absorption model for gas discharge lamp simulation - Malmö:Malmö 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., van der Pol A., IUVA News, 2017, vol. 19, №1, 9-16.